Aus der Frauenklinik der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. H. Roemer

Experimentelle Studie über die Möglichkeit, die Herddosis bei Pendel- und Pendelkonvergenzbestrahlung mit konventionellen Röntgenstrahlen zu berechnen.

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Jürgen Rager
aus Chemnitz

1964

7691

Druck: Julius Wagner Stuttgart-Bad Cannstatt Schönestraße 23

Aus der Frauenklinik der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. H. Roemer

Experimentelle Studie über die Möglichkeit, die Herddosis bei Pendel- und Pendelkonvergenzbestrahlung mit konventionellen Röntgenstrahlen zu berechnen.

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Jürgen Rager
aus Chemnitz

R. UNIV. BIBLIOTHEK LEIPZIG

Dekan: Professor Dr. Dr. E. Fröhlich
1. Berichterstatter: Professor Dr. H.-J. Spechter
2. Berichterstatter: Professor Dr. G. Breitling

Meinen lieben Eltern

Inhaltsverzeichnis

Seite

Einleitung 9

Begriffe der Bewegungsbestrahlung und Abkürzungen... 10

Grundsätzliche Überlegungen und Problemstellung..... 11

Versuchsanordnung 13

Vorversuche 17

Versuchsergebnisse:

1. Bestimmung der mittleren Herdtiefe (B) und des mittleren durchstrahlten Durchmessers (A) 19

2. Messung der Freiluftwerte für die Herddosis und für die Durchgangsdosis 19

3. Messung der Herddosis und der Durchgangsdosis bei Pendelbestrahlung 21

4. Messung der Herddosis und der Durchgangsdosis bei Pendelkonvergenzbestrahlung 21

5. Ermittlung eines Korrekturfaktors 23

6. Berechnung der Herddosis nach der korrigierten Gleichung 24

7. Verminderung der Herddosis durch eine Bleiabdeckung 25

8. Verminderung der Durchgangsdosis durch eine Bleiabdeckung 26

Fehlerrechnung 29

Kritische Schlußbetrachtung 32

Zusammenfassung 33

Tabellen 34

Schrifttum 60

Lebenslauf 62

Tabellen

Seite

Tab. 1: Mittlere Herdtiefen und mittlere durchstrahlte Durchmesser 35

Tab. 2- 3: Freiluftdosen bei Pendelbestrahlung ..... 36 - 37

Tab. 4- 5: Freiluftdosen bei Pendelkonvergenzbestrahlung 38 - 39

Tab. 6- 7: Versuchsergebnisse bei Pendelbestrahlung ..... 40 - 41

Tab. 8- 9: Versuchsergebnisse bei Pendelkonvergenzbestrahlung ..... 42 - 43

Tab. 10-11: Gegenüberstellung von gemessener und errechneter Herddosis ..... 44 - 45

Tab. 12-13: Zusammenstellung der Absorptionskoeffizienten 46 - 47

Tab. 14-19: Berechnung der Herddosis ..... 48 - 53

Tab. 20-21: Versuchsergebnisse bei Pendelbestrahlung bei Bleiabdeckung ..... 54 - 55

Tab. 22-23: Versuchsergebnisse bei Pendelkonvergenzbestrahlung bei Bleiabdeckung ..... 56 - 57

Tab. 24-25: Verminderung der Herddosis durch eine Bleiabdeckung ..... 58 - 59

Abbildungen
und
Graphische Darstellungen

Seite

Abb. 1 Phantomquerschnitte 14

Abb. 2 Abschattung der DD-Kammer bei verschiedenen Tischhöhen 18

Abb. 3 Freiluftwerte der Durchgangsdosen 20

Abb. 4 Die Absorptionskoeffizienten μ_1 und μ_2 ... 22

Abb. 5/6 Verminderung der Herddosis durch eine Bleiabdeckung ..... 27 - 28

Einleitung:

Das Problem der exakten Herddosisbestimmung bei Pendel- und Pendelkonvergenzbestrahlung am einzelnen Patienten ist noch ungelöst.

Das Prinzip des üblichen Verfahrens der Ermittlung der Dosis in der Tiefe bei der Bewegungsbestrahlung besteht darin, in Anlehnung an die Stehfeldbestrahlung, von der Oberflächendosis ausgehend die Tiefendosis den Tabellen zu entnehmen, die von den Herstellerfirmen von Therapiegeräten geliefert werden. (1, 11).

Für die reine Rotationsbestrahlung und für zentrische Lage des Herdes ist ein Verfahren der Herddosiserrechnung bekannt, das auf der Messung der Durchgangsdosis beruht (2-7). Der Grundgedanke dabei ist, daß bei konstanten Arbeitsbedingungen die einzige variable Größe, nämlich die Ausmaße des strahlenabsorbierenden Medium, die Herddosis und die Durchgangsdosis gleichsinnig beeinflußt. Die Beziehung zwischen Herddosis und Durchgangsdosis erlaubt es nun, aus dem gemessenen Durchgangsdosiswert, d.h. dem daraus errechnetem Wert der prozentualen Leistung der Durchgangsdosis (% des Röntgenwertes), den zugehörigen Wert der prozentualen Herddosisleistung aus einem Nomogramm abzulesen. Dieses Verfahren berücksichtigt die Absorptionsunterschiede im Gewebe. Es kommt daher der individuellen Herddosisbestimmung am nächsten.

Diese Arbeit soll nun anhand von Messungen am homogenen Wasserphantom prüfen, ob es möglich ist, in der Pendel- und Pendelkonvergenzbestrahlung mit konventionellen Röntgenstrahlen eine Beziehung zwischen der Herddosis und der Durchgangsdosis zu finden, mit dem Ziel, für jeden Patienten aus der gemessenen Durchgangsdosis, auch bei exzentrischer Lage des Herdes, die Herddosis zu bestimmen.

Begriffe der Bewegungsbestrahlung und Abkürzungen:

Drehpunkt (DrP): Punkt, auf den der Zentralstrahl während der ganzen Drehbewegung gerichtet ist.

Durchgangsdosis (DD): Röntgendosis in 90 cm Focus - Kammer-Abstand.

Feldgröße: Feldgröße in der Gegend des Drehpunktes.

Herdtiefe: Geringster Abstand von Herdmitte zur Oberfläche.

Herdabstand: Momentaner Abstand Herdmittelpunkt-Oberfläche.

Mittlerer Herdabstand: Arithmetisches Mittel aller Herdabstände.

P 200°: Pendelbestrahlung über einen Winkel von 200°.

PK 180°/60°: Pendelkonvergenzbestrahlung mit einer Pendelbewegung über einen Winkel von 180° und einem Konvergenzwinkel von 60°.

Prozentuale Herddosisleistung: $\frac{\text{Herddosis} \times 100}{\text{Zeit} \times \text{RW}}$
(HD-Leistung in % des RW)

Prozentuale Durchgangsdosisleistung: DD-Leistung in % des RW.

Röntgenwert (RW): Freiluftdosis in 50 cm Focusabstand.

Rotationsbestrahlung: Bestrahlung über einen Winkel von 360°, wobei die Röhre eine Kreisbahn beschreibt.

Translation: Bewegung senkrecht zur Kreisbewegung.

Grundsätzliche Überlegungen und Problemstellung:

Die Fragestellung, ob bei Pendel- und Pendelkonvergenzbestrahlung eine Beziehung zwischen der Herddosis und der Durchgangsdosis besteht, führte zu der grundsätzlichen Überlegung, daß für die Größe des Herd- bzw. des Durchgangsdosiswertes die Menge der absorbierten Strahlung gegenüber der entsprechenden Freiluftdosis entscheidend ist.

Aus der Praxis der Cobalt-60-Bestrahlung wird über ein Verfahren berichtet, das zur Berechnung der Herddosis bei Stehfeldbestrahlung den Absorptionskoeffizienten berücksichtigt (8). Die Absorptionsverhältnisse werden dabei durch die Gleichung

$$DD = DD_o \cdot e^{-\mu_1 \cdot a} \qquad (1)$$

definiert, wobei DD die am Patienten gemessene Durchgangsdosis, DD_o die ohne Patient unter gleichen Bedingungen gemessene Freiluftdosis, a der am Patienten durchstrahlte Durchmesser und μ der Absorptionskoeffizient ist.

Für die Herddosis gilt natürlich das Analoge:

$$HD = HD_o \cdot e^{-\mu_2 \cdot b} \qquad (2),$$

wobei HD die Herddosis, HD_o die zugehörige Freiluftdosis und b die Herdtiefe darstellt.

Löst man nun diese beiden Gleichungen jeweils nach μ auf, so ergibt sich aus Gleichung (1),

$$\mu_1 = -\frac{1}{a} \cdot \ln \frac{DD}{DD_o} \qquad (1'),$$

aus Gleichung (2):

$$\mu_2 = -\frac{1}{b} \cdot \ln \frac{HD}{HD_o} \qquad (2').$$

Da der Absorptionskoeffizient eine Materialkonstante darstellt, kann gefolgert werden, daß bei Messung von HD und DD am homogenen Wasserphantom bei gleichem Strahlenspektrum Gleichheit von μ_1 und μ_2 besteht, das bedeutet aber, daß die beiden Gleichungen (1') und (2') gleichgesetzt werden können. Es ergibt sich demnach:

$$-\frac{1}{a} \cdot \ln \frac{DD}{DD_o} = -\frac{1}{b} \cdot \ln \frac{HD}{HD_o} .$$

Daraus folgt für HD:

$$HD = \left(\frac{DD}{DD_o}\right)^{\frac{b}{a}} \cdot HD_o \qquad (3).$$

Diese Gleichung würde nun die Möglichkeit geben, aus der ermessenen Durchgangsdosis bei Kenntnis der Freiluft-Durchgangsdosis, der Freiluft-Herddosis, der Herdtiefe und des durchstrahlten Durchmessers, auf rechnerischem Wege, die Herddosis zu ermitteln.

Unter diesem Gesichtspunkt konzentrierte sich nun die Problemstellung darauf, anhand von Phantom-Messungen festzustellen, ob es möglich ist, diese Gleichung auf die Pendel- und Pendelkonvergenzbestrahlung anzuwenden.

Dazu war es notwendig, folgende Voraussetzungen zu schaffen:

1. Aus den Phantomquerschnitten mußten die mittleren Herdtiefen (B) und die mittleren durchstrahlten Durchmesser (A) bestimmt werden.

2. Messung der Freiluftwerte HD_o und DD_o für die Pendel- und Pendelkonvergenzbestrahlung.

3. Es galt festzustellen, wie groß die Beeinflussung der Herd- und Durchgangsdosen durch ein Bleiblech ist, das bei Bestrahlung des kleinen Beckens zum Schutze des Schenkelhalses üblicherweise verwendet wird.

Versuchsanordnung:

Für die Dosismessungen standen sechs regelmäßig geformte, homogene Phantome aus 3,5 mm starkem Plexiglas zur Verfügung. Es erwies sich als zweckmäßig, die Phantome mit römischen Ziffern I - VI zu kennzeichnen.

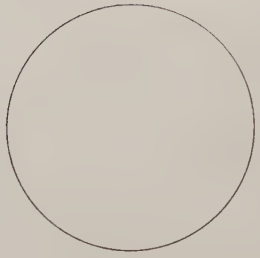
Bei den Phantomen I und II handelte es sich um zwei von Wichmann (12) beschriebene Phantome, ein Zylinderphantom mit einem Radius von 12 cm und ein Ovalphantom von 20 x 30 cm. Die vier Phantome III - VI der Physikalisch-Technischen Werkstätten Freiburg hatten flachovale Querschnitte mit den Ausmaßen 16,5 x 36,5 cm (III), 14 x 37,5 cm (IV), 18,5 x 37 cm (V) und 22,5 x 37 cm (VI) (siehe Abb. 1).

Das Problem der Meßkammerhalterung war bei den Phantomen I und II dadurch gelöst, daß ein in das Phantom einsetzbarer Meßkanal die Schlauchkammer aufnehmen konnte. An den Stirnseiten der Phantome war jeweils ein Koordinatensystem eingraviert, in das in der Horizontalen und Vertikalen Löcher eingestanzt waren. Ein um die Stirnseite herumgreifender Bügel konnte mittels eines Stiftes in die Lochplatte eingerastet werden. Auf diese Weise entstand ein Lokalisationssystem, das es erlaubte, die Kammer an jeden beliebigen Ort des Phantomlumens zu bringen und jeden Meßpunkt reproduzierbar zu machen.

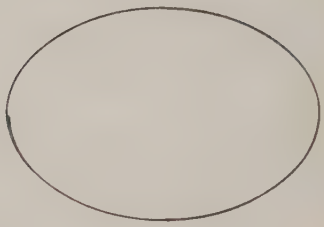
Die Phantome III - VI wurden jeweils mit einer abgedichteten Plexiglasplatte verschlossen, die mit drei Ventilverschlüssen versehen war. Diese waren dazu bestimmt, die Dosimeterschläuche aufzunehmen. In jedes Phantom konnte ein Plexiglasrahmen eingeführt werden, in den in 1 cm Abstand horizontal und vertikal sich überkreuzende Fäden gespannt waren. Dieses Koordinatensystem diente der Kammerlokalisation. In die Ventilverschlüsse eingeführte Plexiglasröhrchen waren in jeder beliebigen Stellung fixierbar. In sie wurden die Schlauchkammern mit der Meßkammer an der Spitze eingeschoben und je nach Lage der Plexiglasröhrchen an einen bestimmten Ort des Phantominnern gebracht.

Zur Dosismessung standen drei Simplex-Dosimeter der Physikalischen-Technischen Werkstätten Freiburg zur Verfügung. Sie konnten wahlweise mit einer 1 r - Kammer oder einer empfindlicheren Durchgangsdosiskammer versehen werden. Die Dosimeter waren mit grünen, roten und blauen Kennmarken versehen. Das

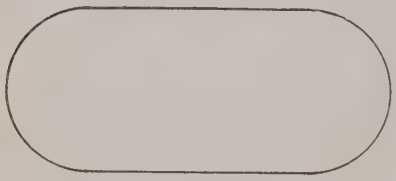
Phantomquerschnitte



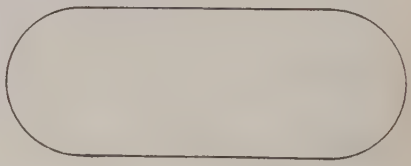
Phantom I



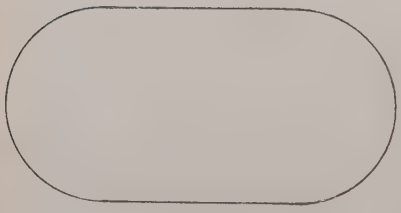
Phantom II



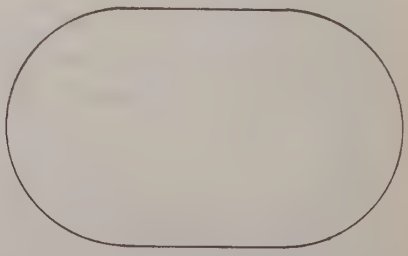
Phantom III



Phantom IV



Phantom V



Phantom VI

Abb. 1

mit einer roten Marke gekennzeichnete Dosimeter diente als Herddosimeter, das grün gekennzeichnete als Durchgangsdosimeter. An den Herd wurde die 1 r - Kammer gebracht, bei der 1 Sprung einer Röntgenstrahlendosis von 1 r entsprach. Bei der empfindlicheren Durchgangsdosiskammer entsprachen 10 Sprünge einer Dosis von 0,8 r. Am Spannungsgerät konnte noch 1/100 eines Sprunges abgelesen werden.

Die Dosimeter wurden täglich mittels eines Radiumnormals geeicht. Die in das Radiumnormal eingeführte Kammer wurde mantelförmig von dem in dem Bleiblock befindlichen Radiumpräparat umgeben. Es wurde nun die Zeit für 1 Sprung bei der 1 r - Kammer und für 10 Sprünge bei der Durchgangsdosiskammer gestoppt und mit einer Normalzeit verglichen. Sie betrug beim Dosimeter "rot" (1 r - Kammer) 16,8 sec., beim Durchgangsdosimeter "grün" 20,4 sec. Der Vergleich ergab Korrekturfaktoren der Meßdaten.

Als Strahlenquelle diente ein Therapie-Universal-Gerät-1 (TU-1) der Fa. C.H.F. Müller. Mit diesem Gerät konnten wahlweise Pendel-, Pendelkonvergenz- und Stehfeldbestrahlungen durchgeführt werden. Der Drehpunkt befand sich in 50 cm Focusabstand. Das Gerät war an der Röhrengegenseite mit einem Gestänge versehen, das sich in 100 cm Focusabstand auf einer Kreisbahn mitbewegte. Dieses Gestänge war in der Längsrichtung frei beweglich und von der Translation unabhängig. Um bei der Pendelkonvergenzbestrahlung die Messung der Durchgangsdosis zu ermöglichen, war es notwendig, daß die DD-Kammer bei der Translationsbewegung der Röhre eine genau entgegengesetzte Bewegung ausführte und sich dabei stets im Zentralstrahl befand. Dieses Problem wurde von der Fa. Müller wie folgt gelöst. Ein Hebelsystem auf der Rückseite des Gerätes verband Röhrenmechanik mit dem beschriebenen Führungsgestänge der DD-Kammer. Auf diese Weise war die erforderliche Mitführung der Kammer bei der Translationsbewegung gewährleistet.

Die mit Wasser gefüllten Phantome wurden nun auf den Lagerungstisch gebracht, der in drei aufeinander senkrecht stehenden Ebenen verstellt werden konnte. Der Tisch mit dem an der Unterseite befindlichen Stahlträger beeinflußten natürlich die Herddosis, besonders stark aber die Durchgangsdosis. Die durch den Tisch bzw. den Stahlträger bedingte Abschattung mußte in die Betrachtung einbezogen werden. Um möglichst

konstante Versuchsbedingungen zu erhalten, wurde die horizontale Tischeinstellung so gewählt, daß sich die Tischmitte stets in +5 cm Entfernung vom Drehpunkt der Röhre befand. Für die Tischhöhe war der jeweilige a.p.-Durchmesser der Phantome maßgebend. Sie mußte von Fall zu Fall eingestellt werden. Der Einfluß des Trägers auf die Herddosismessung war damit ausgeschaltet, der Einfluß auf die Durchgangsdosis mußte durch Messung ermittelt werden.

Bei allen sechs Phantomen wurden die Drehpunkte in die mittlere Querschnittsebene verlegt. Dosismessungen wurden bei Lage des Drehpunktes in Phantom-Mitte (0/0), 4 cm lat. (-4/0) und 5 cm lat. (-5/0) durchgeführt. Die Lage der Drehpunkte konnte mittels des am Gerät vorhandenen Lichtstrahl-Koordinatensystems genau festgelegt werden. Der Schnittpunkt aller drei senkrecht aufeinander stehenden Lichtstrahlen war identisch mit dem Drehpunkt der Röhre.

Alle Messungen wurden mit einem Röntgenwert von 80 r/min. durchgeführt. Bei einer Röhrenspannung von 200 kV und einer Filterung von 0,2 mm Cu (HWS: 0,7 mm Cu) ergaben 15 mA einen RW von 80 r/min., bei 250 kV und einer Filterung von 0,35 mm Cu (HWS: 1,3 mm Cu) wurden mit 11,5 mA 80 r/min. erreicht, bei 250 kV und einer Filterung von 0,5 mm Cu (HWS: 1,6 mm Cu) waren für 80 r/min. 13 mA erforderlich.

Mit diesen drei Strahlenqualitäten wurden an jedem der sechs Phantome und an jedem der drei Drehpunkte folgende Bestrahlungsvorgänge durchgeführt:

1. Pendel 2 x 180° (P 180°) und
   Pendel 2 x 200° (P 200°).

2. Pendelkonvergenz 180° bei voller Translation
   von +30°/-30° (PK 180°/60°) und
   Pendelkonvergenz 200° bei voller Translation
   von +30°/-30° (PK 200°/60°).

Bei P 180°ergab sich eine Bestrahlungsdauer von 57 sec., bei P 200° von 1 min. 3 sec.
Für den ganzen Pendelkonvergenzvorgang wurde eine Bestrahlungsdauer von ca. 9 min. benötigt.

Für alle Messungen wurde eine Feldgröße von 3,5 x 7 cm verwandt.

Vorversuche:

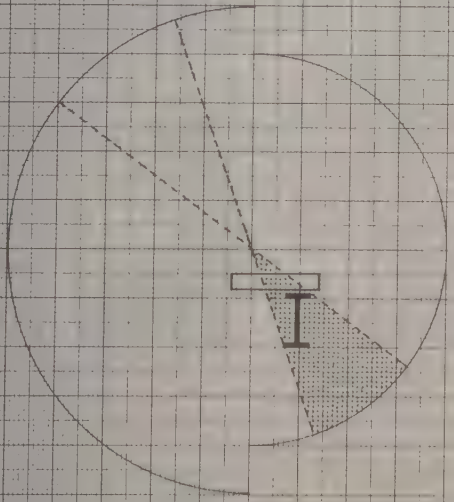
In Vorversuchen wurde die Freiluftdosis in 50 cm Focusabstand mittels der beschriebenen Simplex-Dosimeter und des am Schalttisch des TU-1 angebrachten Röntgenwertmessers geprüft.

Es folgten Kontrollmessungen, um die Abweichung der drei Dosimeter untereinander bei verschiedenen Strahlenhärten (HWS: 0,7 mm Cu, 1,3 mm Cu und 1,6 mm Cu) festzustellen. Sie betrug nie mehr als ± 1,8 %.

Es interessierte ferner die Abweichung der Durchgangsdosiskammer von der 1r-Kammer. Sie betrug maximal ± 2,4 %.

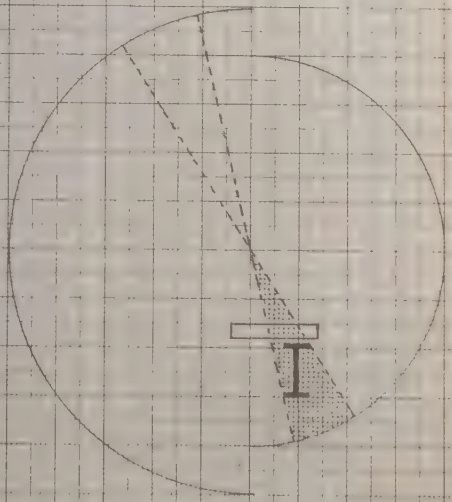
In einer weiteren Reihe von Versuchen wurden gleichzeitig Messungen der Herddosis, der Durchgangsdosis und der Oberflächendosis durchgeführt. Es sollte versucht werden, eine Beziehung zwischen diesen drei Größen zu finden. Es zeigte sich aber, daß dies nicht möglich ist. Der Gedanke wurde deshalb aufgegeben.

Abschattung der DD-Kammer bei verschiedenen Tischhöhen



Tischhöhe 5 cm

Abschattung 35°



Tischhöhe 15 cm

Abschattung 20°

Abb. 2

Versuchsergebnisse:

An den sechs beschriebenen Phantomen wurden insgesamt über 5.000 Dosismessungen vorgenommen. Dazu kamen 136 Messungen der Freiluftwerte. Generell wurden alle Werte als prozentuale Dosisleistung dargestellt, das heißt: alle Meßdaten wurden durch die Bestrahlungszeit dividiert und zum Röntgenwert in Beziehung gesetzt. Dadurch war ein Vergleich der Werte bei Bestrahlung mit verschiedenem Röntgenwert möglich.

1. Bestimmung der mittleren Herdtiefe (B) und des mittleren durchstrahlten Durchmessers (A):

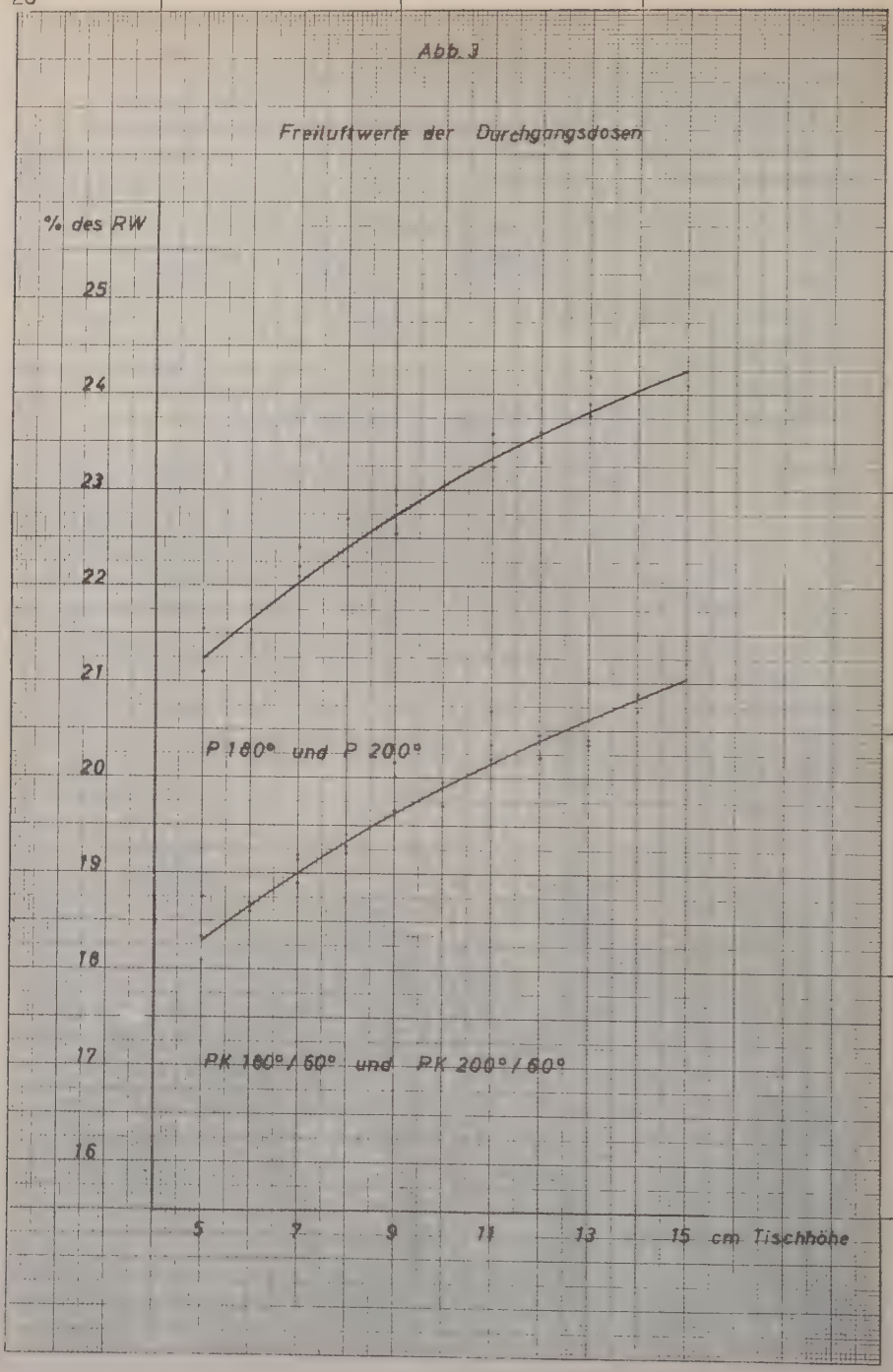
Von allen sechs Phantomen wurden Querschnittszeichnungen im Maßstab 1:1 angefertigt und alle Drehpunkte hineingezeichnet. Die mittlere Herdtiefe (B) ergab sich als arithmetisches Mittel der alle 10° gemessenen Einzelherdtiefen (b), der mittlere durchstrahlte Durchmesser (A) als Mittel der alle 10° gemessenen, durch den DrP gehenden Einzeldurchmesser (a). Die einzelnen Werte können der Tab. 1 entnommen werden.

2. Messung der Freiluftwerte für die Herddosis (HD_o) und für die Durchgangsdosis (DD_o):

Durch die Messung von HD_o und DD_o sollte die Größe der durch den Tisch bedingten Absorption und der Abschattung der Strahlung durch den Stahlträger ermittelt werden. Die Horizontaleinstellung des Tisches wurde konstant gehalten. Dadurch lag lediglich die DD-Kammer im Schatten des Trägers. Wie aus Abb.2 ersichtlich ändert sich der Winkel des Schattens mit der Höhe der Tischeinstellung. Während man bei einer Tischhöhe von 15 cm einen Abschattungswinkel von ca. 20° misst, beträgt er bei einer Tischhöhe von 5 cm ca. 35°. Daraus geht hervor, daß die Messung der Freiluftwerte bei verschiedenen Tischhöhen vorgenommen werden mußte. Die gemessenen Werte bei verschiedenen Filterungen und verschiedenen Bestrahlungsvorgängen sind den Tab. 2-5 zu entnehmen. Es ergab sich dabei die interessante Tatsache, daß bei verschiedenen Filterungen unter gleichen Versuchsbedingungen nahezu gleiche Werte gemessen wurden.

Abb. 3

Freiluftwerte der Durchgangsdosen



Für die Freiluftdosis im DrP (HD_o) ergab sich bei verschiedenen Tischhöhen jeweils ein Wert der gleichen Größenordnung. Bei der Pendelbestrahlung ergab sich eine Streubreite von ± 1,5 %, bei der Pendelkonvergenzbestrahlung von ± 2,5 %. Als Mittelwert für HD_o bei Pendelbestrahlung wurden 92,0 % des RW ermittelt, bei Pendelkonvergenzbestrahlung 80,6 % des RW. Die Werte für DD_o wurden zur Tischhöhe in Beziehung gesetzt und graphisch dargestellt (siehe Abb. 3). Damit ist es möglich, bei einer bestimmten Tischhöhe den entsprechenden DD_o-Wert für Pendel- und Pendelkonvergenzbestrahlung aus der Kurve abzulesen.

3. Messung der Herddosis und der Durchgangsdosis bei Pendelbestrahlung:

Die Dosismessungen ergaben die in den Tabellen 6-7 aufgeführten Werte.

Die durch Messung an sechs Phantomen erzielten Meßdaten für die Herddosis und die Durchgangsdosis bildeten nun die Grundlage für die Prüfung der Frage, ob es möglich ist, die Herddosis aus der gemessenen Durchgangsdosis nach der Formel

$$HD = \left(\frac{DD}{DD_o}\right)^{\frac{A}{B}} \cdot HD_o$$

zu errechnen.

Die bei der Pendelbestrahlung durchgeführte Berechnung zeigt, daß die errechneten Herddosiswerte zwischen 35,0 % und 47,7 % unter den gemessenen Herddosen lagen (Tab. 10), was darauf zurückzuführen ist, daß die Durchgangsdosis ohne Rückstreuung, die Herddosis jedoch mit Rückstreuung und Seitenstreuung gemessen wurde.

4. Messung der Herddosis und der Durchgangsdosis bei Pendelkonvergenzbestrahlung:

Die Dosismessungen ergaben die in den Tabellen 8-9 aufgeführten Werte.

Die durch Messung bei PK 180°/60° und PK 200°/60° ermittelten Durchgangsdosen wurden in gleicher Weise zur Berechnung der der Herddosis verwandt. Als Voraussetzung waren die Freiluft-

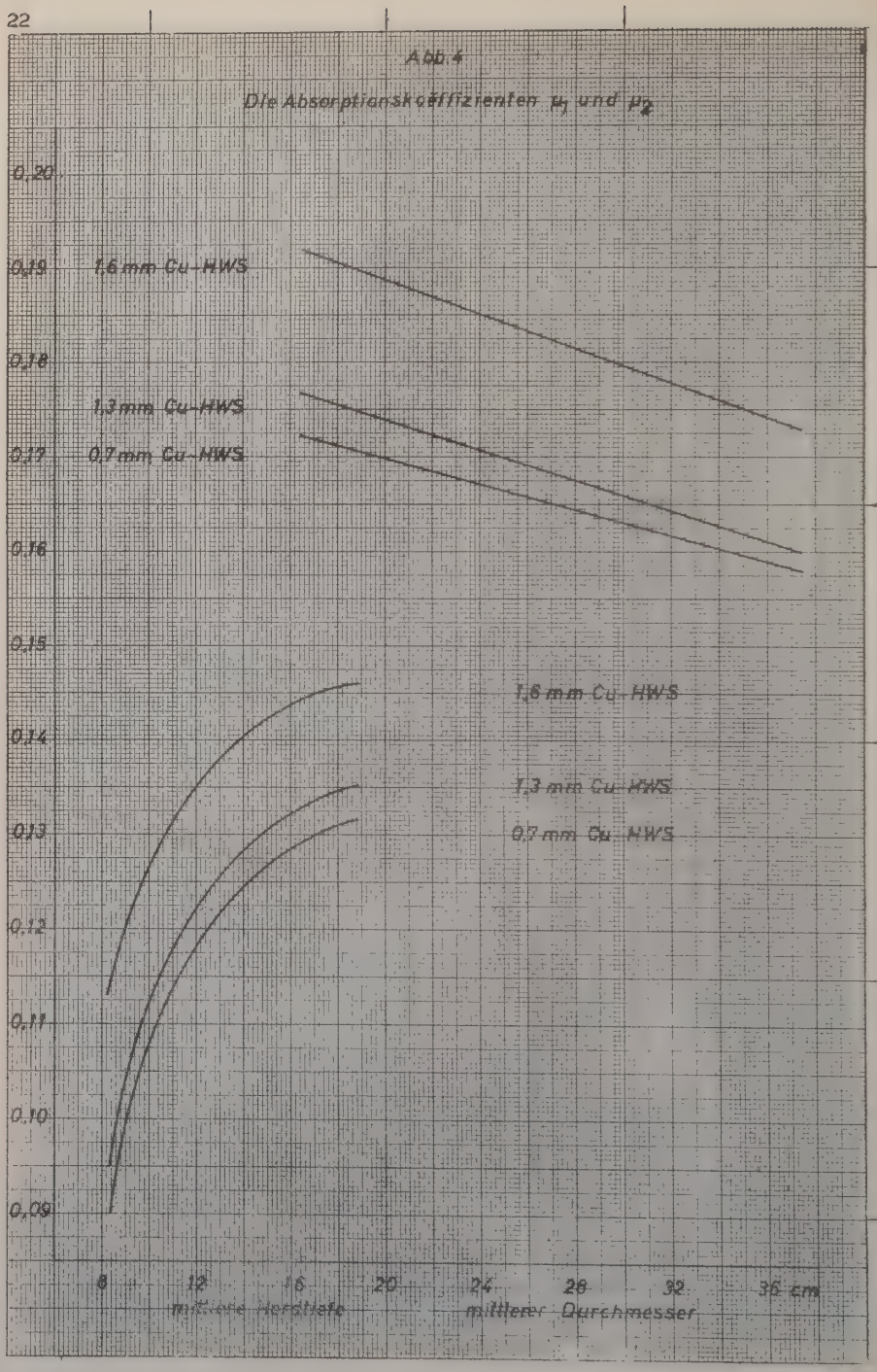


Abb. 4
Die Absorptionskoeffizienten μ_1 und μ_2
0,20
0,19
0,18
0,17
0,16
0,15
0,14
0,13
0,12
0,11
0,10
0,09
1,6 mm Cu-HWS
1,3 mm Cu-HWS
0,7 mm Cu-HWS
1,6 mm Cu-HWS
1,3 mm Cu-HWS
0,7 mm Cu-HWS
8
12
16
20
24
28
32
36 cm
mittlere Herstiefe
mittlerer Durchmesser

werte bei Pendelkonvergenzbestrahlung gegeben. Die Werte für die mittleren Herdtiefen und die mittleren durchstrahlten Durchmesser waren die gleichen wie bei der Pendelbestrahlung. Die durch die Translation bedingte Änderung der einzelnen Werte brauchte nicht berücksichtigt zu werden, da es ja nicht auf die Größe des einzelnen Wertes ankam, sondern auf das Verhältnis B : A, das aber unverändert blieb.

Aus der Tabelle 11 geht hervor, daß die errechneten Herddosiswerte bei der Pendelkonvergenzbestrahlung zwischen 34,2 % und 49,6 % unter den gemessenen Werten lagen. Die Fehlerbreite lag also in der gleichen Größenordnung wie bei der Pendelbestrahlung.

Diese erhebliche Fehlerbreite mußte durch Messung geklärt und als Korrekturfaktor in die Berechnung einbezogen werden.

5. Ermittlung eines Korrekturfaktors:

Die Ursache der Fehlerbreite wurde in folgenden Überlegungen gesucht. Der prozentuale mittlere Fehler von ca. 42,5 % zwischen errechneter und gemessener Herddosis muß zu einem Großteil auf den Einfluß der Streustrahlung zurückgeführt werden. Es ist zu erwarten, daß der Anteil der Streustrahlung an der Durchgangsdosis wesentlich verringert ist, da die Messung in ausreichendem Abstand von den streuenden Phantomen erfolgte; im ungünstigsten Falle betrug der Abstand ca. 20 cm. Zur Herddosis trägt dagegen die Streustrahlung in vollem Maße bei. Die Dosis im Herd enthält daher einen erheblich größeren Anteil an Streustrahlen. Das bedeutet aber, daß die aufgestellte Forderung von der Gleichheit der Absorptionskoeffizienten μ_1 und μ_2 unzutreffend ist.

Es war zu erwarten, daß zwischen der Größe der Streustrahlung und der Herdtiefe bzw. dem durchstrahlten Durchmesser eine Beziehung besteht. Um eine Beziehung zu erhalten, wurden mit den Phantomen III, V und VI Stehfeldbestrahlungen in verschiedenen Winkeln zwischen dem größten und kleinsten Durchmesser durchgeführt. Dazu war es notwendig, die Phantome mit einer Stirnseite nach unten auf den Tisch zu bringen, um die Messungen in verschiedenen Winkeleinstellungen über Tisch-

höhe vornehmen zu können. Die Röhre verblieb bei allen messungen in derselben Einstellung, während die Phantome im DrP (Phantom-Mitte) um jeweils 10^{o} gedreht wurden. Bestrahlt wurde mit einem Röntgenwert von 50 r/min. bei einer Filterung von 0,2 mm Cu, 0,35 mm Cu und 0,5 mm Cu. Gemessen wurde die Herddosis und die Durchgangsdosis in 1 Minute. Aus den gemessenen Dosiswerten wurden nach der Gleichung

$$\mu_1 = -\frac{1}{a} \ln \frac{DD}{DD_o}$$

bzw.

$$\mu_2 = -\frac{1}{b} \ln \frac{HD}{HD_o}$$

die Absorptionskoeffizienten μ_1 und μ_2 bestimmt. Die Messung von HD_o ergab 49,1 r und 14,15 r für DD_o. Die errechneten Absorptionskoeffizienten μ_1 und μ_2 wurden mit den zugehörigen Herdtiefen bzw. den durchstrahlten Durchmessern verglichen, graphisch dargestellt und der ungefähre Kurvenverlauf ermittelt (siehe Abb. 4).

Die der Berechnung der Herddosis dienende Gleichung muß demnach folgendermaßen aussehen:

$$HD = \left(\frac{DD}{DD_o}\right)^{\frac{B}{A} \cdot \frac{\mu_2}{\mu_1}} \cdot HD_o$$

Die Werte von μ_1 und μ_2 werden bei dem entsprechenden mittleren Durchmesser bzw. der mittleren Herdtiefe aus der Abb. 4 ermittelt.

6. Berechnung der Herddosis nach der korrigierten Gleichung:

Die Berechnung der Herddosis erfolgte nach der obigen Formel. Die errechneten Werte wurden wiederum den gemessenen HD-Werten gegenübergestellt und die Differenz in % ausgedrückt.

Die Werte der Pendelbestrahlung sind den Tab. 14-16 dargelegt, die erte der Pendelkonvergenzbestrahlung in den Tabellen 17-19.

Der Vergleich zwischen errechneter und gemessener Herddosis zeigt, daß sich die Fehlerschwankung bei Pendelbestrah-

lung zwischen den Extremen -11,8 % und +12,5 % bewegt, bei Pendelkonvergenzbestrahlung etwas höher in dem Bereich ±13,5 %. Die dafür verantwortlichen Ursachen werden weiter unten diskutiert.

7. Verminderung der Herddosis durch eine Bleiabdeckung:

Das bei der Bestrahlung gynäkologischer Tumoren übliche Verfahren, den Schenkelhals durch ein seitlich aufgelegtes Bleiblech zu schützen (9), wirft die Frage auf, wie groß die hierdurch bedingte Verminderung der Herddosis im Vergleich zur Bestrahlung ohne Bleiabdeckung ist, von welchen Größen sie abhängt und wie sie in der Berechnung zu berücksichtigen ist.

Der Grundgedanke der Überlegungen war nun, daß der eigentliche Vergleichswert für die Verminderung der Herddosis die Zeit sei, in der die HD-Kammer aus dem Strahlengang ausgeblendet ist. Es besteht aber eine Proportionalität zwischen dieser Zeit und der Entfernung des Bleiblechs von dem Focus der Röhre, d.h. die Zeit ist umso geringer je näher das Bleiblech am Focus liegt und umgekehrt. Das bedeutet nun, da der Focus-Drehpunkt-Abstand konstant ist, daß die Zeit umgekehrt proportional der Herdtiefe ist. Damit ist ein meßbarer Parameter für die Verminderung der Herddosis durch eine Bleiabdeckung gegeben.

Um einen geeigneten Vergleich zwischen der Bestrahlung mit und ohne Bleiblech zu erhalten, wurden unter gleichen Bedingungen wie in den Tab. 6-9 Bestrahlungen bei Abdeckung mit einem 7 x 11 cm großen Bleiblech (9) durchgeführt, das seitlich am Phantom angebracht wurde.

Die Ergebnisse dieser Meßreihe sind in den Tab. 20-23 zusammengestellt. Der Vergleich der entsprechenden Herddosen mit und ohne Bleiabdeckung ergibt die in den Tab. 24-25 aufgeführten Werte der Herddosisverminderung. Sie wurden zur Herdtiefe in Beziehung gesetzt und graphisch dargestellt (siehe Abb. 5 und 6).

8. Verminderung der Durchgangsdosis durch eine Bleiabdeckung:

Während die Herddosisverminderung leicht auf eine Vergleichsgröße bezogen werden kann, ist es unmöglich, für die Verminderung der Durchgangsdosis einen einheitlichen Parameter zu finden, da außer der Herdtiefe auch der Abstand des Herdes von der Oberfläche der Gegenseite berücksichtigt werden muß. Da eine gesetzmäßige Abhängigkeit nicht zu erhalten ist, muß man sich darauf beschränken, einen Mittelwert zu errechnen, der die Verminderung der Durchgangsdosis mit hinreichender Genauigkeit berücksichtigt.

Sie beträgt im Mittel bei P 180° 3,4 %, bei P 200° 2,2 %, bei PK 180°/60° 1,7 % und bei PK 200°/60° 1,6 %. Die Phantome I und II blieben bei der Errechnung der Mittelwerte außer Betracht, da ihre andersartigen geometrischen Ausmaße keinen Vergleich zuließen.

Abb. 5

Verminderung der Herddosis durch eine Bleiabdeckung

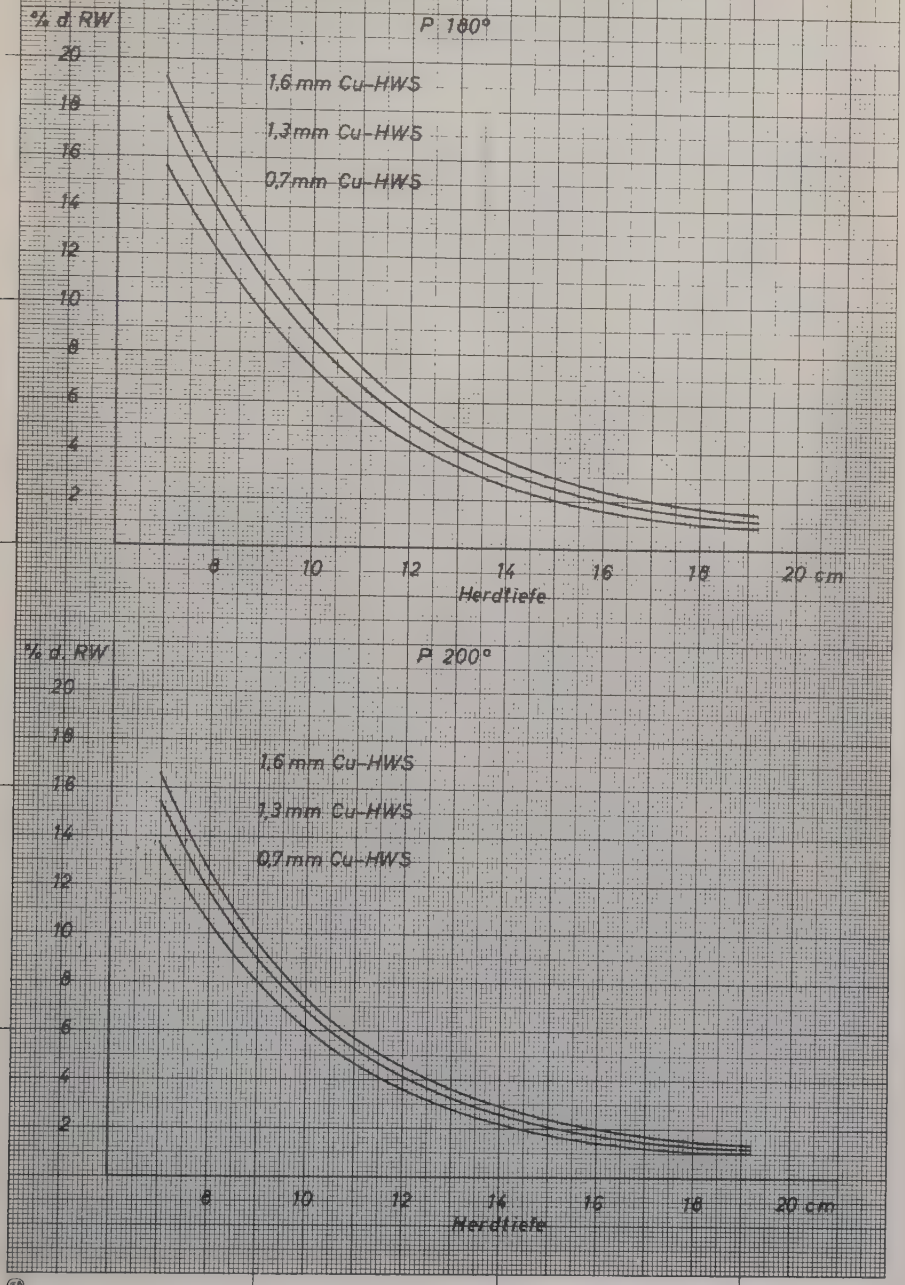
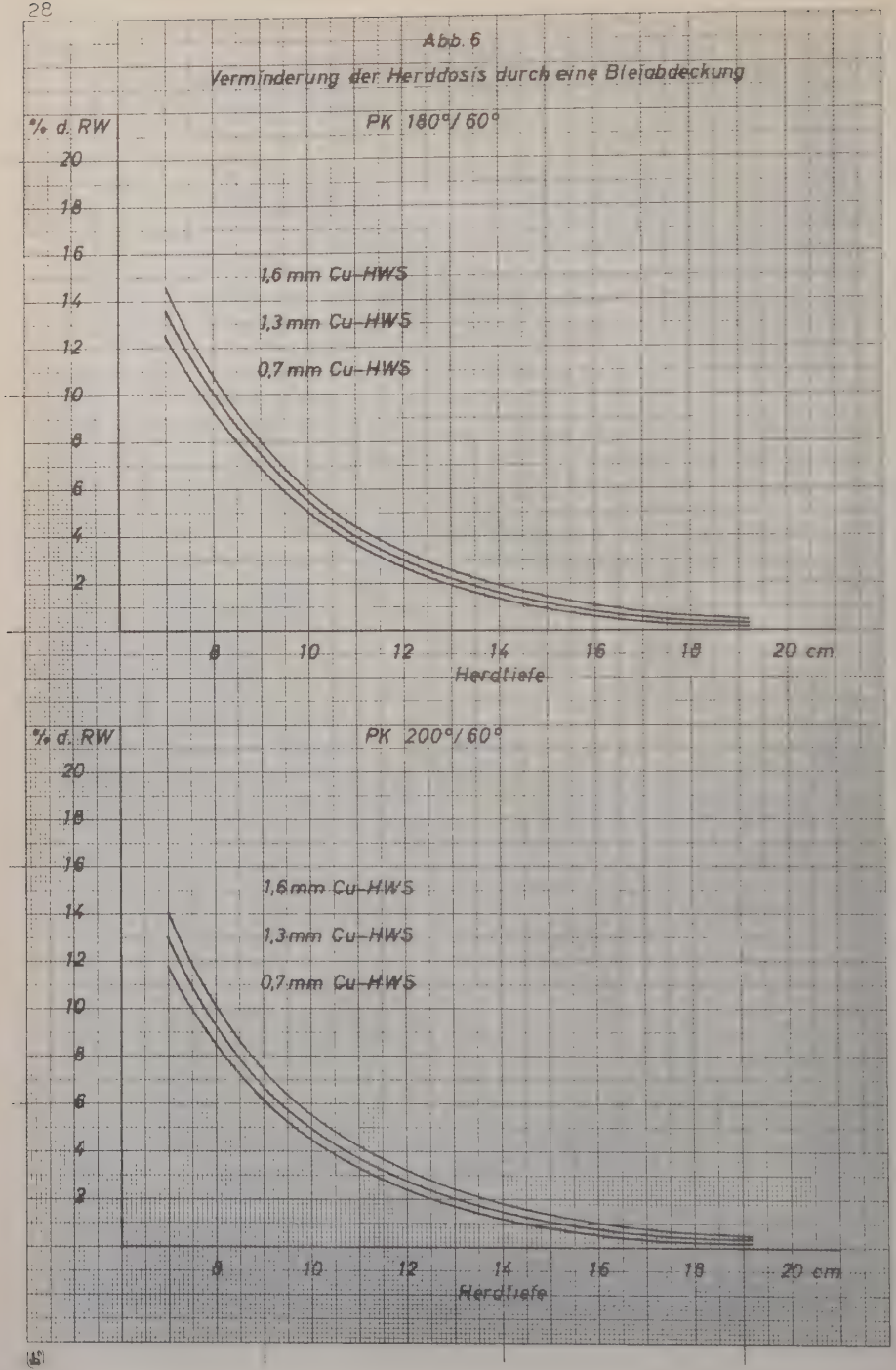


Abb. 6

Verminderung der Herddosis durch eine Bleiabdeckung



Fehlerrechnung:

1. Berechnung des einfachen mittleren Fehlers und des mittleren Fehlers des Mittelwertes einer Gruppe von HD_o - Werten :

Die Messung der Freiluftwerte der Herddosis ergab bei verschiedenen Tischhöhen eine Gruppe von Meßdaten der gleichen Größenordnung. Der Mittelwert der Gruppe sei $\bar{x}$.

a) Pendelbestrahlung: (siehe Tabellen 2-3)
Aus einer Gruppe von 34 Meßdaten ergibt sich als Mittelwert $\bar{x}$:

$$\bar{x} = \frac{\Sigma HD_o}{N} = \frac{3128,6}{34} = \underline{92,0}$$

Der einfache mittlere Fehler s ist die Standardabweichung der Einzelwerte. Es gilt für s:

$$s = \sqrt{\frac{\Sigma(HD_o - \bar{x})^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{21,49}{33}} = \sqrt{0,652} = \underline{\pm\ 0,806}$$

Der mittlere Fehler des Mittelwertes $s_{\bar{x}}$ ist die Standardabweichung des Mittelwertes. Es gilt für $s_{\bar{x}}$:

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{s^2}{N}} = \sqrt{\frac{0,652}{34}} = \sqrt{0,0192} = \underline{\pm\ 0,139}$$

b) Pendelkonvergenzbestrahlung: (siehe Tabellen 4-5)
Aus einer Gruppe von 34 Meßdaten ergibt sich als Mittelwert $\bar{x}$:

$$\bar{x} = \frac{2741,5}{34} = \underline{80,6}$$

Für den einfachen mittleren Fehler s gilt:

$$s = \sqrt{\frac{34,62}{33}} = \sqrt{1,05} = \underline{\pm\ 1,025}$$

Für den mittleren Fehler des Mittelwertes $s_{\bar{x}}$ gilt:

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1,05}{34}} = \sqrt{0,0309} = \underline{\pm\ 0,176}$$

2. Berechnung des einfachen mittleren Fehlers der errechneten Herddosis:

a) Pendelbestrahlung: (siehe Tabellen 18-20)

Die Zusammenstellung der prozentualen Abweichung der errechneten Herddosis von der gemessenen ergibt eine Gruppe von 108 Werten. Die prozentuale Abweichung sei x, dann gilt für den einfachen mittleren Fehler:

$$s = \sqrt{\frac{\Sigma x^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{4511,45}{107}} = \sqrt{42,1} = \underline{\pm 6,5\ \%}$$

b) Pendelkonvergenzbestrahlung: (siehe Tabellen 21-23)

Aus einer Gruppe von 108 Werten ergibt sich für den einfachen mittleren Fehler:

$$s = \sqrt{\frac{4584,13}{107}} = \sqrt{42,8} = \underline{\pm 6,55\ \%}$$

Ergebnisse:

1a)

In dem Bereich 92,0 ± 0,806 (Mittelwert ± einfacher mittlerer Fehler) liegen ca. 68 % der Einzelwerte, in dem Bereich 92,0 ± 2·0,806 liegen ca. 95 %, d.h., daß der HD_o-Wert mit großer Wahrscheinlichkeit in dem Bereich 92,0 ± 0,8 liegt, mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit in dem Bereich 92,0 ± 1,6.

Der mittlere Fehler des Mittelwertes besagt, daß der "wahre" Mittelwert mit 68% Wahrscheinlichkeit in dem Bereich 92,0 ± 0,139 liegt, mit 95 % Wahrscheinlichkeit in dem Bereich 92,0 ± 2·0,139 = 92,0 ± 0,278.

1b)

Bei der Pendelkonvergenzbestrahlung liegen ca. 68 % der Einzelwerte in dem Bereich 80,6 ± 1,025, ca. 95 % in dem Bereich 80,6 ± 2·1,025 = 80,6 ± 2,05.

Der "wahre" Mittelwert liegt mit 68 % Wahrscheinlichkeit in dem Bereich 80,6 ± 0,176, mit 95 % Wahrscheinlichkeit in dem Bereich 80,6 ± 0,352.

2a)

Bei der Berechnung der Herddosis bei Pendelbestrahlung beträgt der einfache mittlere Fehler ± 6,5 %, d.h., daß mit ca. 68 % Wahrscheinlichkeit die errechnete Herddosis innerhalb der Fehlerbreite von ± 6,5 % liegt, mit ca. 95 % Wahrscheinlichkeit in dem Bereich von ± 13,0 %

2b)

Bei der Pendelkonvergenzbestrahlung beträgt der einfache mittlere Fehler der errechneten Herddosis ± 6,55 %, das bedeutet, daß die errechnete HD mit 68 % Wahrscheinlichkeit innerhalb der Fehlerbreite von ± 6,55 % liegt, mit 95 % Wahrscheinlichkeit in dem Bereich von ± 13,1 %.

Kritische Schlußbetrachtung:

In dieser Arbeit sollte anhand von Phantommessungen die Frage geprüft werden, ob bei Bewegungsbestrahlung mit konventionellen Röntgenstrahlen die Berechnung der Herddosis aus der Durchgangsdosis aufgrund der Absorptionsgleichung möglich ist. Unter bestimmten Versuchsbedingungen wurden an sechs homogenen Wasserphantomen Herddosis- und Durchgangsdosismessungen vorgenommen. Die Absorptionsgleichung wurde so abgewandelt, daß eine Beziehung zwischen Herddosis und Durchgangsdosis gegeben war. Die erforderlichen Grundgrößen wurden durch Messung bestimmt. Die gemessenen Werte der Durchgangsdosis dienten als Grundlage für die Berechnung der Herddosis. Die gemessenen Werte der Herddosis gaben die Möglichkeit, einen Vergleich mit den errechneten Werten der Herddosis zu ziehen. Die Standardabweichung der errechneten Herddosis betrug $\pm$ 6,5 %, d.h., die errechnete Herddosis lag mit einer Wahrscheinlichkeit von 68 % innerhalb dieses Bereichs, mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % innerhalb des Bereichs von $\pm$ 13 %. Die Ursache dieser Fehlerschwankung muß in der Variation der Bedingungen gesucht werden, da bei Betrachten aller Einzelwerte keine bestimmte Tendenz gefunden werden kann. Als Fehlerquellen kommen einmal die verwandten Dosimeter in Betracht, deren Meßgenauigkeit $\pm$ 2,5 % betrug, zum andern muß berücksichtigt werden, daß alle zur Berechnung herangezogenen Größen experimentell bestimmt wurden, und daß die graphischen Darstellungen nur annähernd den "wahren" Kurvenverlauf darstellen. Da das Verhältnis der Absorptionszahlen als Potenz in der Gleichung erscheint, können ungenaue Werte das Ergebnis in stärkerem Maße verfälschen.

Im Rahmen der genannten Fehlerbreite kann gesagt werden, daß bei Bewegungsbestrahlung mit konventionellen Röntgenstrahlen die rechnerische Bestimmung der Herddosis aus der Durchgangsdosis möglich ist. Dieses Verfahren gibt die Möglichkeit, unter Berücksichtigung der wirklichen Absorptionsverhältnisse, bei einem bestrahltem Körper die Herddosis an jedem beliebigen Punkt im Innern zu berechnen.

Inwieweit nun dieses am homogenen Phantom gewonnene Ergebnis am Menschen anwendbar ist, kann im Rahmen dieser Arbeit keine Aussage gemacht werden. Dort, wo eine direkte Messung der Herddosis nicht möglich ist, stellt jedes Verfahren der Herddosisbestimmung nur ein Näherungsverfahren dar.

Bei der Bestrahlung von bösartigen Tumoren im kleinen Becken ist es üblich, den Schenkelhals durch eine Bleiabdeckung zu schützen. Das bedeutet aber, daß ein Großteil des knöchernen Beckengürtels, der die Bestimmung der Herddosis problematisch macht, von dem Bestrahlungsvorgang ausgeblendet wird. Auf diese Weise nähert man sich homogenen Absorptionsbedingungen, die eine Anwendung des Verfahrens der rechnerischen Herddosisbestimmung rechtfertigen.

Zusammenfassung:

Nach einer Reihe von Vorversuchen, die der Klärung technischer Fragen und der Präzisierung der Problemstellung dienten, wurden in Meßreihen, in denen über 5.000 Herddosis- und Durchgangsdosismessungen an homogenen Wasserphantomen durchgeführt wurden, die Bedingungen für die Berechnung der Herddosis bei Pendel- und Pendelkonvergenzbestrahlung mit konventionellen Röntgenstrahlen ausgearbeitet. Aus der Absorptionsgleichung wurde eine Formel hergeleitet, die die Verhältnisse bei Bestrahlung unter bestimmten Versuchsbedingungen berücksichtigte und eine Beziehung zwischen der Herddosis und der Durchgangsdosis ergab.

Nachdem die notwendigen Grundgrößen experimentell bestimmt worden waren, konnte die Herddosis aus der gemessenen Durchgangsdosis berechnet werden. Die errechneten Herddosen wurden mit den entsprechenden gemessenen Werten verglichen. Aus einer größeren Reihe von Vergleichswerten konnte die Fehlerbreite ermittelt werden.

T A B E L L E N

Tab. 1

Mittlere Herdtiefen (B) und mittlere durchstrahlte Durchmesser (A):
(in cm)

Phantom	Tischhöhe	DrP	P.W. 180° B	P.W. 180° A	P.W. 200° B	P.W. 200° A
I	14,0	Mitte	12,0	24,0	12,0	24,0
		4 cm lat.	9,8	23,6	10,0	23,5
		5 cm lat.	8,4	22,9	8,8	22,8
II	10,5	Mitte	12,7	24,1	11,9	23,7
		4 cm lat.	10,0	22,0	10,5	21,8
		5 cm lat.	9,4	23,3	9,5	22,9
III	11,5	Mitte	12,5	25,4	12,1	24,6
		4 cm lat.	11,1	24,6	10,9	23,9
		5 cm lat.	10,8	24,4	10,6	23,7
IV	10,0	Mitte	11,3	22,5	10,9	21,7
		4 cm lat.	10,2	22,3	9,9	21,6
		5 cm lat.	9,9	22,2	9,7	21,5
V	12,5	Mitte	13,4	26,6	13,0	26,0
		4 cm lat.	12,0	26,3	11,5	25,7
		5 cm lat.	11,5	26,2	11,3	25,5
VI	11,0	Mitte	14,8	29,5	14,5	29,0
		4 cm lat.	13,0	29,2	12,6	28,7
		5 cm lat.	12,5	29,0	12,2	28,5

Tab. 2

Freiluft-Dosen bei Pendelbestrahlung:

I. P 180° 0,35 mm Cu-Filter 250 kV

Tischhöhe in cm	Dosis im DrP HD_o in % d. RW	Dosis in 90 cm Focus-Abstand DD_o in % d. RW
15	92,3	24,1
14	92,3	24,0
13	92,3	23,8
12	91,7	23,5
11	92,5	23,5
10	92,5	23,05
9	92,0	22,85
8	92,8	22,7
7	92,0	22,1
6	91,6	21,8
5	91,4	21,1

II. P 200° 0,35 mm Cu-Filter 250 kV

Tischhöhe in cm	Dosis im DrP HD_o in % d. RW	Dosis in 90 cm Focus-Abstand DD_o in % d. RW
15	92,1	24,35
14	91,9	24,0
13	92,3	23,6
12	92,3	23,6
11	91,4	23,25
10	92,5	23,05
9	92,4	23,0
8	91,5	22,2
7	93,5	22,4
6	90,9	21,55
5	91,0	21,1

Freiluft-Dosen bei Pendelbestrahlung:

I. P 180° 0,2 mm Cu-Filter 200 kV

Tischhöhe in cm	Dosis im DrP HD_o in % d. RW	Dosis in 90 cm Focus-Abstand DD_o in % d. RW
15	93,4	24,3
13	93,4	24,2
11	93,5	23,6
9	92,7	22,55
7	92,2	22,1
5	92,6	20,65

P 180° 0,5 mm Cu-Filter 250 kV

Tischhöhe in cm	Dosis im DrP HD_o in % d. RW	Dosis in 90 cm Focus-Abstand DD_o in % d. RW
15	93,5	24,75
13	92,1	24,2
11	92,8	23,5
9	93,6	23,1
7	92,8	22,4
5	92,8	21,6

Tab. 4

Freiluft-Dosen bei Pendelkonvergenzbestrahlung:

I. PK 180°/60° 0,35 mm Cu-Filter 250 kV

Tischhöhe in cm	Dosis im DrP HD_o in % d. RW	Dosis in 90 cm Focus-Abstand DD_o in % d. RW
15	80,0	20,4
14	81,0	20,85
13	80,0	20,6
12	79,5	20,2
11	80,3	20,2
10	80,0	19,93
9	80,6	20,0
8	80,0	19,93
7	80,0	18,91
6	80,0	18,6
5	79,3	18,32

II. PK 200°/60° 0,35 mm Cu-Filter 250 kV

Tischhöhe in cm	Dosis im DrP HD_o in % d. RW	Dosis in 90 cm Focus-Abstand DD_o in % d. RW
15	80,0	20,55
14	81,2	20,7
13	79,9	20,4
12	80,0	20,45
11	81,2	20,35
10	80,0	19,7
9	80,0	19,6
8	79,4	19,2
7	80,9	19,15
6	80,6	18,66
5	79,4	18,3

Tab. 5

Freiluft-Dosen bei Pendelkonvergenzbestrahlung:

II. PK 180°/60° 0,2 mm Cu-Filter 200 kV

Tischhöhe in cm	Dosis im DrP HD_o in % d. RW	Dosis in 90 cm Focus-Abstand DD_o in % d. RW
15	81,2	21,2
13	82,4	20,9
11	83,3	20,7
9	80,2	19,65
7	81,5	19,2
5	82,5	18,o5

PK 180°/60° 0,5 mm Cu-Filter 250 kV

Tischhöhe in cm	Dosis im DrP HD_o in % d. RW	Dosis in 90 cm Focus-Abstand DD_o in % d. RW
15	80,4	21,0
13	81,3	21,0
11	82,0	20,6
9	81,0	20,19
7	80,3	19,2
5	81,9	18,75

Tab. 6

Versuchsergebnisse bei Pendelbestrahlung:
(in % des Röntgenwertes)

1. P 180°

Phantom	DrP	HWS: 0,7 mm Cu HD	DD	HWS: 1,3 mm Cu HD	DD	HWS: 1,6 mm Cu HD	DD
I	Mitte	20,85	0,318	24,3	0,465	25,3	0,495
	4 cm lat.	33,7	0,368	37,3	0,527	38,0	0,567
	5 cm lat.	38,7	0,396	43,3	0,58	43,7	0,61
II	Mitte	19,7	0,316	22,85	0,495	23,55	0,491
	4 cm lat.	27,45	0,355	30,8	0,526	31,8	0,653
	5 cm lat.	30,02	0,432	34,9	0,573	37,25	0,627
III	Mitte	19,14	0,352	23,22	0,532	23,7	0,556
	4 cm lat.	22,88	0,406	26,5	0,576	27,5	0,62
	5 cm lat.	25,0	0,434	28,1	0,6	28,35	0,633
IV	Mitte	25,7	0,608	29,3	0,837	29,9	0,876
	4 cm lat.	28,0	0,62	32,1	0,855	32,2	0,89
	5 cm lat.	29,81	0,676	33,8	0,922	34,5	0,985
V	Mitte	17,24	0,25	19,3	0,379	20,85	0,401
	4 cm lat.	20,21	0,286	23,6	0,421	24,41	0,449
	5 cm lat.	21,5	0,367	25,7	0,429	26,o	0,447
VI	Mitte	13,43	0,139	16,0	0,211	16,72	0,231
	4 cm lat.	16,6	0,151	19,58	0,232	2o,45	0,25
	5 cm lat.	18,1	0,157	21,8	0,245	22,58	0,262

Tab. 7

Versuchsergebnisse bei Pendelbestrahlung:
(in % des Röntgenwertes)

2. P 200°

Phantom	DrP	HWS: 0,7 mm Cu HD	HWS: 0,7 mm Cu DD	HWS: 1,3 mm Cu HD	HWS: 1,3 mm Cu DD	HWS: 1,6 mm Cu HD	HWS: 1,6 mm Cu DD
I	Mitte	20,75	0,34	24,8	0,472	23,7	0,496
	4 cm lat.	31,8	0,374	35,75	0,541	36,5	0,58
	5 cm lat.	36,65	0,412	41,7	0,589	42,2	0,64
II	Mitte	20,6	0,352	23,73	0,506	24,52	0,54
	4 cm lat.	26,9	0,402	30,95	0,576	31,9	0,61
	5 cm lat.	30,0	0,44	33,4	0,618	35,25	0,67
III	Mitte	20,52	0,426	24,1	0,594	25,1	0,645
	4 cm lat.	23,39	0,457	27,25	0,661	27,85	0,71
	5 cm lat.	25,6	0,502	29,0	0,69	28,5	0,7
IV	Mitte	28,5	0,709	31,95	0,964	32,53	1,012
	4 cm lat.	30,5	0,722	34,05	0,973	35,25	1,02
	5 cm lat.	30,59	0,76	34,6	1,05	35,85	1,122
V	Mitte	18,5	0,291	21,9	0,437	22,38	0,461
	4 cm lat.	21,0	0,331	24,55	0,489	25,2	0,51
	5 cm lat.	22,55	0,333	26,35	0,498	26,82	0,527
VI	Mitte	14,05	0,159	16,81	0,24	17,55	0,258
	4 cm lat.	17,1	0,173	20,41	0,265	21,2	0,287
	5 cm lat.	18,8	0,184	22,15	0,276	23,0	0,297

Tab. 8

Versuchsergebnisse bei Pendelkonvergenzbestrahlung:
(in % des Röntgenwertes)

1. PK 180°/60°

Phantom	DrP	HWS: 0,7 mm Cu HD	HWS: 0,7 mm Cu DD	HWS: 1,3 mm Cu HD	HWS: 1,3 mm Cu DD	HWS: 1,6 mm Cu HD	HWS: 1,6 mm Cu DD
	Mitte	16,92	0,229	20,48	0,356	20,4	0,373
I	4 cm lat.	27,8	0,268	31,4	0,398	31,85	0,426
	5 cm lat.	33,04	0,296	36,8	0,43	37,5	0,465
	Mitte	16,0	0,235	18,93	0,348	19,8	0,371
II	4 cm lat.	22,55	0,273	26,15	0,4	26,75	0,434
	5 cm lat.	25,45	0,303	28,7	0,436	29,6	0,466
	Mitte	16,08	0,279	18.86	0,406	19,44	0,431
III	4 cm lat.	18,4	0,316	22,0	0,446	22,85	0,479
	5 cm lat.	20,45	0,332	23,35	0,465	23,76	0,49
	Mitte	21,0	0,462	24,0	0,647	24,74	0,684
IV	4 cm lat.	23,45	0,497	26,75	0,675	27,3	0,721
	5 cm lat.	25,0	0,533	28,41	0,733	29,21	0,782
	Mitte	14,15	0,191	16,9	0,288	17,44	0,306
V	4 cm lat.	16,62	0,216	19,47	0,314	20,22	0,338
	5 cm lat.	18,39	0,222	21,1	0,324	21,95	0,346
	Mitte	10,71	0,099	12,86	0,154	13,3	0,166
VI	4 cm lat.	13,51	0,112	15,98	0,172	16,38	0,183
	5 cm lat.	15,1	0,12	17,69	0,18	18,45	0,196

Versuchsergebnisse bei Pendelkonvergenzbestrahlung:
(in % des Röntgenwertes)

2. PK 200°/60°

Phantom	DrP	HWS: 0,7 mm Cu HD	DD	HWS: 1,3 mm Cu HD	DD	HWS: 1,6 mm Cu HD	DD
	Mitte	17,45	0,237	19,66	0,35	20,67	0,383
I	4 cm lat.	26,85	0,293	3o,3	0,408	31,0	0,434
	5 cm lat.	31,35	0,31	35,6	0,446	36,0	0,477
	Mitte	16,96	0,265	19,62	0,384	20,45	0,419
II	4 cm lat.	22,3	0,3	25,8	0,438	26,72	0,468
	5 cm lat.	25,1	0,333	28,4	0,477	29,3	0,516
	Mitte	17,4	0,326	20,15	0,463	20,45	0,486
III	4 cm lat.	19,49	0,366	22,88	0,513	23,49	0,543
	5 cm lat.	21,05	0,382	24,3	0,54	24,9	0,574
	Mitte	23,55	0,58	26,3	0,74	27,41	0,804
IV	4 cm lat.	25,39	0,568	28,28	0,769	29,25	0,836
	5 cm lat.	25,9	0,615	29,4	0,831	30,2	0,882
	Mitte	15,35	0,222	18,22	0,329	18,8	0,354
V	4 cm lat.	17,35	0,247	2o,35	0,36	2o,8	0,38
	5 cm lat.	18,71	0,254	21,99	0,371	22,79	0,398
	Mitte	11,4	0,112	13,71	0,177	14,19	0,189
VI	4 cm lat.	13,8	0,127	16,41	0,196	17,11	0,21
	5 cm lat.	15,5	0,137	18,29	0,208	18,89	0,224

Tab. 10

Gegenüberstellung von gemessenem und errechnetem HD:
(alle Dosiswerte in % des RW)

1. P 180° HWS: 1,3 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	24,3	12,8	47,3 %
	5 cm lat.	43,3	23,5	45,7 %
II	Mitte	22,85	12,0	47,5 %
	5 cm lat.	34,9	20,6	41,0 %
III	Mitte	23,22	14,35	38,2 %
	5 cm lat.	28,1	18,2	35,2 %
IV	Mitte	29,3	17,5	40,3 %
	5 cm lat.	33,8	18,3	45,9 %
V	Mitte	19,3	11,5	40,4 %
	5 cm lat.	25,7	15,8	38,5 %
VI	Mitte	16,0	8,74	45,4 %
	5 cm lat.	21,8	12,9	40,8 %

2. P 200° HWS: 1,3 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	24,8	12,94	47,7 %
	5 cm lat.	41,7	22,0	47,2 %
II	Mitte	23,73	13,5	43,0 %
	5 cm lat.	33,4	20,55	38,5 %
III	Mitte	24,1	15,0	37,7 %
	5 cm lat.	29,0	18,85	35,0 %
IV	Mitte	31,95	18,7	41,5 %
	5 cm lat.	34,6	22,4	35,3 %
V	Mitte	21,9	12,55	42,7 %
	5 cm lat.	26,35	16,7	36,5 %
VI	Mitte	16,81	9,35	44,1 %
	5 cm lat.	22,15	13,8	37,6 %

Tab. 11

Gegenüberstellung von gemessenem und errechnetem HD:
(alle Dosiswerte in % des RW)

1. PK 180°/60° HWS: 1,3 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	20,48	10,52	48,5 %
	5 cm lat.	36,8	19,4	47,3 %
II	Mitte	18,93	9,54	49,6 %
	5 cm lat.	28,7	17,1	40,4 %
III	Mitte	18,86	11,75	37,7 %
	5 cm lat.	23,35	15,1	35,4 %
IV	Mitte	24,0	14,45	39,8 %
	5 cm lat.	28,41	18,5	35,0 %
V	Mitte	16,9	9,4	44,4 %
	5 cm lat.	21,1	13,05	38,2 %
VI	Mitte	12,86	7,0	35,3 %
	5 cm lat.	17,69	10,5	40,6 %

2. PK 200°/60° HWS: 1,3 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	19,66	10,45	46,9 %
	5 cm lat.	35,6	18,3	48,6 %
II	Mitte	19,62	11,0	44,0 %
	5 cm lat.	28,4	17,1	39,9 %
III	Mitte	20,15	12,55	37,8 %
	5 cm lat.	24,3	15,5	36,2
IV	Mitte	26,3	15,45	41,1 %
	5 cm lat.	29,4	19,35	34,2 %
V	Mitte	18,22	10,15	44,4 %
	5 cm lat.	21,99	13,65	37,9 %
VI	Mitte	13,71	7,55	45,0 %
	5 cm lat.	18,29	11,35	38,0 %

Zusammenstellung der Absorptionskoeffizienten μ_4:

Phantom	a (in cm)	Absorptionskoeffizient HWS: 0,7 mm Cu	HWS: 1,3 mm Cu	HWS: 1,6 mm Cu
III	16,5	0,195	0,1775	0,1735
	16,8	0,192	0,174	0,1694
	17,6	0,1892	0,1725	0,1687
	19,2	0,189	0,1725	0,1688
	21,8	0,185	0,171	0,1675
	25,8	0,1855	0,1682	0,1658
	33,7	0,1765	0,1621	0,1601
	36,7	0,174	0,161	0,1586
V	18,2	0,198	0,183	0,179
	18,8	0,192	0,1765	0,172
	19,7	0,191	0,1738	0,1694
	21,4	0,189	0,173	0,1695
	24,4	0,1865	0,1705	0,168
	28,2	0,181	0,1661	0,1561
	31,8	0,1775	0,1621	0,161
	34,5	0,175	0,161	0,159
	36,4	0,1729	0,1602	0,1582
	37,3	0,173	0,1595	0,1579
VI	22,5	0,1925	0,1759	0,1719
	22,9	0,1906	0,1725	0,1692
	24,0	0,1842	0,171	0,167
	26,0	0,1839	0,169	0,167
	28,9	0,179	0,164	0,1623
	31,6	0,1778	0,1632	0,1618
	33,8	0,177	0,163	0,1606
	35,5	0,1731	0,1613	0,1588
	36,9	0,173	0,159	0,158
	37,2	0,174	0,1625	0,159

Tab. 13

Zusammenstellung der Absorptionskoeffizienten μ_2:

Phantom	b (in cm)	Absorptionskoeffizient HWS: 0,7 mm Cu	HWS: 1,3 mm Cu	HWS: 1,6 mm Cu
	8,3	0,1093	0,095	0,091
	8,4	0,1096	0,0968	0,0913
	8,8	0,1209	0,1011	0,0956
	9,6	0,12	0,1085	0,1047
	10,9	0,1252	0,1145	0,1115
	12,9	0,1344	0,1223	0,1195
	16,85	0,1441	0,131	0,1287
	18,4	0,1465	0,134	0,1313
	9,1	0,1185	0,111	0,1075
	9,4	0,1218	0,111	0,1058
	9,9	0,1235	0,1116	0,1061
	10,7	0,1285	0,1155	0,1104
	12,2	0,1362	0,1213	0,1142
	14,1	0,1394	0,127	0,1261
	15,9	0,1409	0,1281	0,1271
	17,3	0,1425	0,1303	0,128
	18,2	0,144	0,1315	0,1295
	18,8	0,1465	0,1343	0,1315
	11,25	0,137	0,122	0,117
	11,5	0,14	0,125	0,122
	12,0	0,1386	0,1265	0,121
	13,0	0,1405	0,1279	0,127
	14,5	0,142	0,129	0,1254
	15,8	0,143	0,1316	0,1291
	16,9	0,1435	0,1315	0,1306
	17,8	0,1428	0,1325	0,1293
	18,4	0,1475	0,1355	0,1325
	18,6	0,1492	0,1345	0,132

Tab. 14

Berechnung der Herddosis:

(alle Dosiswerte in % des RW)

1. P 180° HWS: 0,7 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	20,85	19,1	- 8,5 %
	4 cm lat.	33,7	30,8	- 8,6 %
	5 cm lat.	38,7	37,0	- 4,5 %
II	Mitte	19,7	17,5	-11,0 %
	4 cm lat.	27,45	26,0	- 5,3 %
	5 cm lat.	30,o2	32,3	+ 6,0 %
III	Mitte	19,14	20,1	+ 4,7 %
	4 cm lat.	22,88	25,2	+ 9,0 %
	5 cm lat.	25,0	26,75	+ 6,5 %
IV	Mitte	25,7	25,15	- 2,0 %
	4 cm lat.	28,0	30,2	+ 7,5 %
	5 cm lat.	29,81	32,35	+ 7,7 %
V	Mitte	17,24	16,3	- 5,4 %
	4 cm lat.	20,21	21,0	+ 3,6 %
	5 cm lat.	23,6	23,7	+ 0,4 %
VI	Mitte	13,43	12,45	- 7,5 %
	4 cm lat.	16,6	16,7	+ 0,6 %
	5 cm lat.	18,1	18,25	+ 0,9 %

2. P 200° HWS: 0,7 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	20,75	19,75	- 9,0 %
	4 cm lat.	31,8	28,2	-11,2 %
	5 cm lat.	36,65	34,1	- 7,0 %
II	Mitte	20,6	20,3	- 1,5 %
	4 cm lat.	26,9	24,3	- 9,5 %
	5 cm lat.	30,0	31,4	+ 4,5 %
III	Mitte	20,52	22,0	+ 6,5 %
	4 cm lat.	23,39	26,7	+12,5 %
	5 cm lat.	25,6	28,0	+ 8,5 %
IV	Mitte	28,5	28,8	+ 1,0 %
	4 cm lat.	30,5	32,2	+ 5,4 %
	5 cm lat.	30,59	33,7	+ 9,5 %
V	Mitte	18,5	17,7	- 4,2 %
	4 cm lat.	21,0	23,25	+ 9,6 %
	5 cm lat.	22,55	23,8	+ 5,3 %
VI	Mitte	14,05	13,34	- 5,0 %
	4 cm lat.	17,1	18,95	+ 9,8 %
	5 cm lat.	18,8	19,9	+ 5,5 %

Berechnung der Herddosis:
(alle Dosiswerte in % des RW)

1. P 180° HWS: 1,3 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	24,3	21,9	-10,0 %
	4 cm lat.	37,3	32,9	-11,8 %
	5 cm lat.	43,3	43,7	+ 1,0 %
II	Mitte	22,85	20,9	- 8,5 %
	4 cm lat.	30,8	30,0	- 2,5 %
	5 cm lat.	34,9	35,9	+ 2,8 %
III	Mitte	23,22	21,4	- 7,8 %
	4 cm lat.	26,5	28,6	+ 7,3 %
	5 cm lat.	28,1	30,1	+ 7,0 %
IV	Mitte	25,7	25,15	- 2,0 %
	4 c m lat.	32,1	34,1	+ 5,8 %
	5 cm lat.	33,8	36,4	+ 6,5 %
V	Mitte	19,3	19,2	- 0,5 %
	4 cm lat.	23,6	23,7	+ 0,4 %
	5 cm lat.	25,7	25,2	- 2,0 %
VI	Mitte	16,0	14,5	- 9,4 %
	4 cm lat.	19,58	19,5	- 0,4 %
	5 cm lat.	21,8	21,4	- 2,0 %

2. P 200° HWS: 1,3 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	24,8	22,6	- 9,0 %
	4 cm lat.	35,75	32,2	-10,0 %
	5 cm lat.	41,7	39,5	- 5,4 %
II	Mitte	23,73	22,7	- 4,3 %
	4 cm lat.	30,95	28,1	- 9,0 %
	5 cm lat.	33,4	35,7	+ 6,5 %
III	Mitte	24,1	25,0	+ 3,5 %
	4 cm lat.	27,25	30,0	+ 9,0 %
	5 cm lat.	29,0	31,7	+ 8,5 %
IV	Mitte	31,95	32,5	+ 1,6 %
	4 cm lat.	34,05	36,2	+ 6,0 %
	5 cm lat.	34,6	38,7	+10,5 %
V	Mitte	21,9	21,0	- 4,0 %
	4 cm lat.	24,55	26,9	+ 8,5 %
	5 cm lat.	26,35	27,4	+ 3,8 %
VI	Mitte	16,81	15,6	- 7,1 %
	4 cm lat.	20,41	21,3	+ 4,0 %
	5 cm lat.	22,15	22,7	+ 2,5 %

Tab. 16

Berechnung der Herddosis:

(alle Dosiswerte in % des RW)

1. P 180° HWS: 1,6 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	25,3	23,0	- 9,0 %
	4 cm lat.	38,0	34,2	-10,0 %
	5 cm lat.	43,7	44,1	+ 1,0 %
II	Mitte	23,55	21,3	- 9,5 %
	4 cm lat.	31,8	32,8	+ 3,0 %
	5 cm lat.	37,25	37,7	+ 1,2 %
III	Mitte	23,7	24,35	+ 2,8 %
	4 cm lat.	27,5	30,0	+ 8,5 %
	5 cm lat.	28,35	31,4	+ 9,5 %
IV	Mitte	29,9	30,0	+ 0,4 %
	4 cm lat.	32,2	35,1	+ 8,3 %
	5 cm lat.	34,5	37,7	+ 8,5 %
V	Mitte	20,85	19,9	- 4,3 %
	4 cm lat.	24,41	24,6	+ 0,5 %
	5 cm lat.	26,0	27,25	+ 4,6 %
VI	Mitte	16,72	15,4	- 7,8 %
	4 cm lat.	20,45	20,65	+ 1,0 %
	5 cm lat.	22,58	22,2	- 1,7 %

2. P 200° HWS: 1,6 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	23,7	23,3	- 1,6 %
	4 cm lat.	36,5	32,9	-10,0 %
	5 cm lat.	42,2	41,1	- 2,5 %
II	Mitte	24,52	23,6	- 3,0 %
	4 cm lat.	31,9	29,2	- 8,5 %
	5 cm lat.	35,25	37,1	+ 5,0 %
III	Mitte	25,2	26,2	+ 3,7 %
	4 cm lat.	27,85	31,2	+10,6 %
	5 cm lat.	28,5	32,4	+12,0 %
IV	Mitte	32,53	33,6	+ 3,0 %
	4 cm lat.	35,25	37,4	+ 5,6 %
	5 cm lat.	35,85	39,4	+ 9,0 %
V	Mitte	22,38	21,8	- 2,5 %
	4 cm lat.	25,2	27,8	+ 9,1 %
	5 cm lat.	26,82	28,1	+ 4,5 %
VI	Mitte	17,55	16,1	- 8,0 %
	4 cm lat.	21,2	22,3	+ 4,0 %
	5 cm lat.	23,0	23,8	+ 3,5 %

Berechnung der Herddosis:
(alle Dosiswerte in % des RW)

1. PK 180°/60° HWS: 0,7 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	16,92	15,75	- 7,0 %
	4 cm lat.	27,8	24,0	-13,5 %
	5 cm lat.	33,04	31,2	- 5,5 %
II	Mitte	16,0	14,5	- 9,3 %
	4 cm lat.	22,55	21,9	- 3,0 %
	5 cm lat.	25,45	26,6	+ 4,0 %
III	Mitte	16,08	17,0	+ 5,6 %
	4 cm lat.	18,4	21,3	+13,5 %
	5 cm lat.	20,45	22,3	+ 8,0 %
IV	Mitte	21,0	21,1	+ 0,5 %
	4 cm lat.	23,45	26,0	+ 9,5 %
	5 cm lat.	25,0	27,5	+10,0 %
V	Mitte	14,15	13,75	- 2,6 %
	4 cm lat.	16,62	17,55	+ 5,0 %
	5 cm lat.	18,39	19,5	+ 5,7 %
VI	Mitte	10,71	10,0	- 6,5 %
	4 cm lat.	13,51	14,05	+ 3,6 %
	5 cm lat.	15,1	15,4	+ 2,0 %

2. PK 200°/60° HWS: 0,7 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	17,45	16,0	- 7,5 %
	4 cm lat.	26,85	23,8	-11,4 %
	5 cm lat.	31,35	29,0	- 7,5 %
II	Mitte	16,96	16,75	- 1,1 %
	4 cm lat.	22,3	20,25	- 9,0 %
	5 cm lat.	25,1	26,55	+ 5,5 %
III	Mitte	17,4	19,2	+ 9,4 %
	4 cm lat.	19,49	22,25	+12,5 %
	5 cm lat.	21,05	23,6	+10,6 %
IV	Mitte	23,55	23,5	- 0,2 %
	4 cm lat.	25,39	27,4	+ 7,2 %
	5 cm lat.	25,9	29,4	+12,0 %
V	Mitte	15,35	14,75	- 4,0 %
	4 cm lat.	17,35	19,25	+10,0 %
	5 cm lat.	18,71	19,95	+ 6,3 %
VI	Mitte	11,4	10,68	- 6,5 %
	4 cm lat.	13,8	15,05	+ 8,0 %
	5 cm lat.	15,5	15,0	- 3,4 %

Tab. 18

Berechnung der Herddosis:

(alle Dosiswerte in % des RW)

1. PK 180°/60° HWS: 1,3 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	20,48	18,7	- 8,5 %
	4 cm lat.	31,4	27,8	-11,0 %
	5 cm lat.	36,8	35,9	- 5,0 %
II	Mitte	18,93	18,85	- 0,5 %
	4 cm lat.	26,15	25,1	- 4,0 %
	5 cm lat.	28,7	30,7	+ 6,5 %
III	Mitte	18,86	19,7	+ 4,1 %
	4 cm lat.	22,0	24,1	+ 8,5 %
	5 cm lat.	23,35	25,5	+ 8,4 %
IV	Mitte	24,0	24,3	+ 1,0 %
	4 cm lat.	26,75	29,1	+ 8,0 %
	5 cm lat.	28,41	31,0	+ 8,4 %
V	Mitte	16,9	16,35	- 3,0 %
	4 cm lat.	19,47	19,85	+ 1,8 %
	5 cm lat.	21,1	22,1	+ 5,0 %
VI	Mitte	12,86	11,89	- 7,5 %
	4 cm lat.	15,98	16,25	+ 1,5 %
	5 cm lat.	17,69	17,8	+ 0,6 %

2. PK 200°/60° HWS: 1,3 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	19,66	18,6	- 5,4 %
	4 cm lat.	30,3	26,9	-11,2 %
	5 cm lat.	35,6	33,4	- 6,1 %
II	Mitte	19,62	18,75	- 4,3 %
	4 cm lat.	25,8	23,5	- 9,0 %
	5 cm lat.	28,4	30,3	+ 6,2 %
III	Mitte	20,15	21,05	+ 4,2 %
	4 cm lat.	22,88	25,3	+ 9,4 %
	5 cm lat.	24,3	26,4	+ 7,8 %
IV	Mitte	26,3	26,7	+ 1,5 %
	4 cm lat.	28,28	31,4	+10,0 %
	5 cm lat.	29,4	32,4	+ 9,0 %
V	Mitte	18,22	17,35	- 5,0 %
	4 cm lat.	20,35	22,2	+ 8,4 %
	5 cm lat.	21,99	23,1	+ 5,0 %
VI	Mitte	13,71	12,75	- 7,0 %
	4 cm lat.	16,41	17,5	+ 6,0 %
	5 cm lat.	18,29	19,05	+ 4,0 %

Berechnung der Herddosis:

(alle Dosiswerte in % des RW)

1. PK 180°/60° HWS: 1,6 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	20,4	19,34	- 5,0 %
	4 cm lat.	31,85	28,0	- 9,0 %
	5 cm lat.	37,5	36,7	- 2,0 %
II	Mitte	19,8	19,65	- 0,8 %
	4 cm lat.	26,75	26,6	- 0,5 %
	5 cm lat.	29,6	31,6	+ 6,5 %
III	Mitte	19,44	20,55	+ 5,3 %
	4 cm lat.	22,85	25,4	+10,0 %
	5 cm lat.	23,76	26,6	+10,6 %
IV	Mitte	24,74	25,2	+ 1,7 %
	4 cm lat.	27,3	29,3	+ 7,0 %
	5 cm lat.	29,21	32,1	+ 8,9 %
V	Mitte	17,44	17,0	- 1,5 %
	4 cm lat.	20,22	21,1	+ 4,0 %
	5 cm lat.	21,95	23,0	+ 4,6 %
VI	Mitte	13,3	12,5	- 6,0 %
	4 cm lat.	16,38	16,8	+ 2,5 %
	5 cm lat.	18,45	18,75	+ 1,7 %

2. PK 200°/60° HWS: 1,6 mm Cu

Phantom	DrP	gemessenes HD	errechnetes HD	Differenz
I	Mitte	20,67	19,5	- 5,5 %
	4 cm lat.	31,0	28,0	- 9,6 %
	5 cm lat.	36,0	35,7	- 0,7 %
II	Mitte	20,45	20,6	+ 1,0 %
	4 cm lat.	26,72	24,5	- 8,4 %
	5 cm lat.	29,3	31,4	+ 7,0 %
III	Mitte	20,45	21,65	+ 5,5 %
	4 cm lat.	23,49	26,3	+10,5 %
	5 cm lat.	24,9	27,9	+10,8 %
IV	Mitte	27,41	27,2	- 0,6 %
	4 cm lat.	29,25	32,2	+ 9,0 %
	5 cm lat.	30,2	33,7	+10,5 %
V	Mitte	18,8	18,15	- 3,4 %
	4 cm lat.	20,8	23,2	+10,3 %
	5 cm lat.	22,79	23,9	+ 4,5 %
VI	Mitte	14,19	13,5	- 5,0 %
	4 cm lat.	17,11	18,5	+ 7,6 %
	5 cm lat.	18,89	20,0	+ 5,6 %

Tab. 20

Versuchsergebnisse bei Pendelbestrahlung:
(in % des Röntgenwertes)

1. P 180° bei Bleiabdeckung

Phantom	DrP	HWS: 0,7 mm Cu HD	HWS: 0,7 mm Cu DD	HWS: 1,3 mm Cu HD	HWS: 1,3 mm Cu DD	HWS: 1,6 mm Cu HD	HWS: 1,6 mm Cu DD
I	Mitte	16,18	0,235	19,o	0,349	19,6	0,379
	4 cm lat.	21,6	0,22	24,2	0,358	24,9	0,381
	5 cm lat.	23,1	0,258	26,3	0,382	21,32	0,406
II	Mitte	17,52	0,298	20,4	0,422	21,4	0,457
	4 cm lat.	21,72	0,329	25,1	0,473	25,87	0,511
	5 cm lat.	25,9	0,356	26,42	0,51	27,8	0,551
III	Mitte	18,5	0,35	22,1	0,516	22,2	0,545
	4 cm lat.	20,62	0,378	24,1	0,564	24,45	0,594
	5 cm lat.	21,9	0,418	24,7	0,579	25,5	0,622
IV	Mitte	24,65	0,585	27,95	0,814	28,39	0,852
	4 cm lat.	25,9	0,598	29,6	0,775	29,9	0,88
	5 cm lat.	27,25	0,663	30,41	0,902	31,45	0,964
V	Mitte	16,2	0,246	19,2	0,365	20,19	0,397
	4 cm lat.	18,06	0,278	21,13	0,41	22,41	0,454
	5 cm lat.	19,3	0,279	22,2	0,406	23,1	0,436
VI	Mitte	12,28	0,131	14,91	0,202	14,86	0,21
	4 cm lat.	14,42	0,142	16,92	0,216	17,82	0,236
	5 cm lat.	15,56	0,149	18,45	0,228	19,39	0,244

Versuchsergebnisse bei Pendelbestrahlung:
(in % des Röntgenwertes)

. P 200° bei Bleiabdeckung

ıantom	DrP	HWS: 0,7 mm Cu HD	DD	HWS: 1,3 mm Cu, HD	DD	HWS: 1,6 mm Cu HD	DD
	Mitte	16,45	0,246	19,12	0,361	20,05	0,385
I	4 cm lat.	21,6	0,259	24,3	0,389	24,65	0,416
	5 cm lat.	22,75	0,274	26,0	0,419	26,45	0,45
	Mitte	18,02	0,436	21,55	0,471	22,6	0,513
II	4 cm lat.	21,12	0,366	25,35	0,523	26,4	0,569
	5 cm lat.	23,72	0,456	26,45	0,563	28,25	0,625
	Mitte	20,4	0,419	23,0	0,581	23,8	0,624
III	4 cm lat.	21,45	0,447	25,05	0,65	25,8	0,69
	5 cm lat.	23,0	0,49	26,05	0,68	26,79	0,729
	Mitte	27,4	0,692	30,7	0,946	31,19	0,995
IV	4 cm lat.	28,41	0,7	32,0	0,962	32,9	0,992
	5 cm lat.	28.8	0,769	32,45	1,05	32,95	1,101
	Mitte	17,4	0,278	20,75	0,421	21,3	0,451
V	4 cm lat.	18,95	0,323	22,15	0,475	22,9	0,501
	5 cm lat.	20.32	0,329	23,43	0,475	24,42	0,509
	Mitte	13,17	0,151	15,55	0,229	16,2	0,246
VI	4 cm lat.	15,2	0,166	17,9	0,248	18,75	0,272
	5 cm lat.	16,3	0,175	19,05	0,256	20,15	0,287

Tab. 22

Versuchsergebnisse bei Pendelkonvergenzbestrahlung:
(in % des Röntgenwertes)

1. PK 180°/60° bei Bleiabdeckung

Phantom	DrP	HWS: 0,7 mm Cu HD	DD	HWS: 1,3 mm Cu HD	DD	HWS: 1,6 mm Cu HD	DD
I	Mitte	14,11	0,189	16,74	0,284	17,49	0,311
	4 cm lat.	18,7	0,186	21,3	0,277	21,75	0,296
	5 cm lat.	20,16	0,202	23,1	0,293	23,61	0,312
II	Mitte	15,0	0,223	17,71	0,329	18,21	0,353
	4 cm lat.	18,85	0,251	22,15	0,371	22,85	0,394
	5 cm lat.	20,45	0,276	23,24	0,381	23,95	0,421
III	Mitte	15,8	0,279	18,48	0,408	19,06	0,425
	4 cm lat.	17,4	0,313	20,5	0,431	22,2	0,529
	5 cm lat.	18,8	0,326	21,55	0,456	22,4	0,486
IV	Mitte	21,o	0,468	23,85	0,648	24,05	0,679
	4 cm lat.	22,5	0,489	25,25	0,674	26,39	0,716
	5 cm lat.	23,79	0,53	26,8	0,722	27,25	0,769
V	Mitte	14,05	0,191	16,29	0,268	17,0	0,302
	4 cm lat.	15,66	0,213	18,4	0,311	19,2	0,335
	5 cm lat.	16,61	0,212	19,4	0,312	19,9	0,336
VI	Mitte	10,15	0,097	11,71	0,151	12,87	0,165
	4 cm lat.	12,38	0,108	14,58	0,164	15,3	0,179
	5 cm lat.	13,76	0,112	16,09	0,176	16,6	0,187

Versuchsergebnisse bei Pendelkonvergenzbestrahlung:
(in % des Röntgenwertes)

2. PK 200°/60° bei Bleiabdeckung

Phantom	DrP	HWS: 0,7 mm Cu HD	DD	HWS: 1,3 mm Cu HD	DD	HWS: 1,6 mm Cu HD	DD
I	Mitte	14,55	0,184	16,81	0,308	17,9	0,32
	4 cm lat.	18,34	0,201	21,0	0,301	21,55	0,32
	5 cm lat.	2o,o	0,212	21,95	0,322	23,1	0,343
II	Mitte	15,84	0,254	18,75	0,372	19,3	0,392
	4 cm lat.	19,56	0,284	22,4	0,407	23,1	0,436
	5 cm lat.	20,58	0,306	23,5	0,445	24,2	0,468
III	Mitte	17,1	0,324	19,66	0,461	20,4	0,488
	4 cm lat.	18,31	0,345	21,55	0,5	22,2	0,531
	5 cm lat.	19,75	0,378	22,52	0,525	23,17	0,574
IV	Mitte	23,1	0,54	26,1	0,747	26,8	0,791
	4 cm lat.	24,29	0,515	27,35	0,77	28,0	0,791
	5 cm lat.	24,9	0,61	27,95	0,828	28,79	0,877
V	Mitte	15,o9	0,22	17,49	0,321	18,26	0,349
	4 cm lat.	16,4	0,244	18,85	0,35	19,6	0,368
	5 cm lat.	17,56	0,253	20,28	0,358	21,0	0,388
VI	Mitte	11,11	0,113	12,52	0,172	13,86	0,188
	4 cm lat.	12,96	0,124	15,32	0,188	15,78	0,204
	5 cm lat.	14,35	0,134	16,65	0,201	17,4	0,215

Verminderung der Herddosis durch eine Bleiabdeckung:

(alle Dosiswerte in % des RW)

1. P 180°

Phantom	DrP	DrP-Tiefe (in cm)	Verminderung der Herddosis HWS:0,7 mm Cu	HWS:1,3 mm Cu	HWS:1,6 mm
I	Mitte	12,0	4,67	5,3	5,7
	4 cm lat.	8,0	12,1	13,1	13,1
	5 cm lat.	7,0	15,6	17,0	22,38
II	Mitte	15,0	2,18	2,45	2,15
	4 cm lat.	11,0	5,73	5,7	5,93
	5 cm lat.	10,0	4,12	8,48	5,45
III	Mitte	18,7	0,64	1,12	1,5
	4 cm lat.	14,7	2,26	2,4	3,05
	5 cm lat.	13,7	3,1	3,4	2,85
IV	Mitte	19,2	1,05	1,35	1,51
	4 cm lat.	15,2	2,1	2,5	2,3
	5 cm lat.	14,2	2,56	3,39	3,05
V	Mitte	19,0	1,04	0,1	0,66
	4 cm lat.	15,0	2,15	2,47	2,0
	5 cm lat.	14,0	2,2	3,5	2,9
VI	Mitte	18,8	1,15	1,09	1,86
	4 cm lat.	14,8	2,18	2,66	2,63
	5 cm lat.	13,8	2,54	3,35	3,19

2. P 200°

Phantom	DrP	DrP-Tiefe (in cm)	Verminderung der Herddosis HWS:0,7 mm Cu	HWS:1,3 mm Cu	HWS:1,6 mm
I	Mitte	12,0	4,3	5,69	3,65
	4 cm lat.	8,0	10,2	11,45	11,85
	5 cm lat.	7,0	13,9	15,7	15,75
II	Mitte	15,0	2,58	2,18	1,92
	4 cm lat.	11,0	5,78	5,6	5,5
	5 cm lat.	10,0	6,28	6,95	7,0
III	Mitte	18,7	0,12	1,1	1,4
	4 cm lat.	14,7	1,94	2,2	2,05
	5 cm lat.	13,7	2,6	2,95	1,71
IV	Mitte	19,2	1,1	1,25	1,34
	4 cm lat.	15,2	2,09	2,05	3,35
	5 cm lat.	14,2	1,79	2,15	2,9
V	Mitte	19,0	1,1	1,15	1,08
	4 cm lat.	15,0	2,05	2,4	2,3
	5 cm lat.	14,0	2,23	2,92	2,4
VI	Mitte	18,8	0,88	1,26	1,35
	4 cm lat.	14,8	1,9	2,51	2,45
	5 cm lat.	13,8	2,5	3,1	2,85

Verminderung der Herddosis durch eine Bleiabdeckung:

(alle Dosiswerte in % des RW)

1. PK 180°/60°

Phantom	DrP	DrP-Tiefe (in cm)	Verminderung der Herddosis HWS:0,7 mm Cu	HWS:1,3 mm Cu	HWS:1,6 mm Cu
I	Mitte	12,0	2,81	3,74	2,91
	4 cm lat.	8,0	9,1	10,1	10,1
	5 cm lat.	7,0	12,88	13,7	13,89
II	Mitte	15,0	1,0	1,22	1,59
	4 cm lat.	11,0	3,7	4,0	3,8
	5 cm lat.	10,0	5,0	5,46	5,65
III	Mitte	18,7	0,28	0,38	0,38
	4 cm lat.	14,7	1,0	1,5	0,65
	5 cm lat.	13,7	1,65	1,8	1,56
IV	Mitte	19,2	0,0	0,15	0,69
	4 cm lat.	15,2	0,95	1,5	0,91
	5 cm lat.	14,2	1,21	1,61	1,96
V	Mitte	19,0	0,1	0,61	0,44
	4 cm lat.	15,0	0,96	1,07	1,02
	5 cm lat.	14,0	1,78	1,7	2,05
VI	Mitte	18,8	0,56	1,15	0,43
	4 cm lat.	14,8	1,13	1,4	1,08
	5 cm lat.	13,8	1,34	1,6	1,85

2. PK 200°/60°

Phantom	DrP	DrP-Tiefe (in cm)	Verminderung der Herddosis HWS:0,7 mm Cu	HWS:1,3 mm Cu	HWS:1,6 mm Cu
I	Mitte	12,0	2,9	3,85	2,77
	4 cm lat.	8,0	8,51	9,3	9,45
	5 cm lat.	7,0	11,35	14,65	12,9
II	Mitte	15,0	1,12	0,87	1,15
	4 cm lat.	11,0	2,74	3,4	3,62
	5 cm lat.	10,0	4,53	4,9	5,1
III	Mitte	18,7	0,3	0,49	0,05
	4 cm lat.	14,7	1,18	1,33	1,29
	5 cm lat.	13,7	1,3	1,78	1,73
IV	Mitte	19,2	0,45	0,2	0,61
	4 cm lat.	15,2	1,1	0,93	1,25
	5 cm lat.	14,2	1,3	1,45	1,41
V	Mitte	19,0	0,26	0,73	0,54
	4 cm lat.	15,0	0,95	1,5	1,2
	5 cm lat.	14,0	1,15	1,71	1,79
VI	Mitte	18,8	0,29	1,19	0,23
	4 cm lat.	14,8	0,84	1,09	1,33
	5 cm lat.	13,8	1,15	1,54	1,49

Schrifttum

(1) Grebe, L. und Wiebe, W.: Tabellen zur Dosierung d Röntgenstrahlen, Verlag Urban & Schwarzenberg, Berlin u München, 1950.

(2) Janker, R. u. a.: Grundlagen und Praxis der Bewegung bestrahlung, Verlag W. Girardet, Wuppertal - Elberfeld, 1955, S. 102-109.

(3) Neumann, W. und Wachsmann, F.: Ermittlung d Herddosis bei Rotationsbestrahlung unter Berücksichtigung der Absorptionsunterschiede im Gewebe, Strahlentherapie (1954).

(4) Du Mesnil de Rochemont, R.: Dosierungsgrundlagen bei Rotationsbestrahlung, Strahlentherapie 63 (1937).

(5) Ders.: Die Dosierung bei Rotationsbestrahlung, Strahlentherapie 63 (1938).

(6) Ders.: Zur Dosenberechnung bei der Rotationsbestrahlu Strahlentherapie 66 (1939).

(7) Robbins, R. und Mészaros, J.: The calculati of rotation therapy tumor doses at 250 kV by means of th transmitted dose rate, Radiology 63 (1954).

(8) Schulz, R.J., Cohen, G.A., Tsai, J.P. and Evans, J.C.: Cobalt-60 Depth-Dose Corrections as Determined by Transmission-Dose Measurements, Radiology 76 (1961), S. 805-817.

(9) Spechter, H.-J.: Experimentelle Studien über die Bewegungsbestrahlung im kleinen Becken bei gynäkologisch Tumoren, Strahlentherapie 102 (1957).

(10) Wachsmann, F und Sarth, G.: Die Bewegungsbestrahlung, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1959, 2. Au S. 32-48.

(11) Wichmann, H.: Tabellen zur Dosierung bei Bewegung bestrahlung am Universaltherapiegerät Müller-TU 1.

(12) Wichmann, H. und Heinzel, F.: Leitfaden der Bewegungsbestrahlung, I. Teil, Springer-Verlag 1959, S. 97-98.

Herrn Professor Dr.H.-J. S p e c h t e r, unter dessen Leitung diese Arbeit durchgeführt wurde, schulde ich für seine vielseitigen wertvollen Ratschläge und stete Hilfsbereitschaft verbindlichsten Dank. Ebenso danke ich Herrn Professor Dr.G. B r e i t l i n g für seine Beratung und wertvollen Anregungen.

L e b e n s l a u f

Am 12. Dezember 1936 wurde ich, Jürgen, Wolfgang R a g e r, als Sohn des Arztes Dr. med. Fritz Rager und seiner Ehefrau Elli geb. Keßner in Chemnitz in Sachsen geboren.

Von 1949 an besuchte ich das Staatliche Gymnasium in Hechingen in Hohenzollern, wo ich im Jahre 1957 die Reifeprüfung ablegte. Im selben Jahr begann ich mein medizinisches Studium in Würzburg, wo ich im Jahre 1959 die ärztliche Vorprüfung bestand. Mein klinisches Studium setzte ich in Würzburg, Wien und Tübingen fort. In Tübingen bestand ich am 14. Dezember 1962 das medizinische Staatsexamen. Meine Medizinalassistentenzeit begann ich mit einer halbjährigen Tätigkeit in der väterlichen Praxis in Hechingen. Vom Juli 1963 an bin ich an der chirurgischen Abteilung des Kreiskrankenhauses in Freudenstadt als Medizinalassistent beschäftigt.

September 1963